

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



# Simulación del comportamiento de diversos modelos de amortiguadores magneto-reológicos mediante Modelica

---

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

Proyecto realizado por:

D. Javier Arranz Iglesias

Tutoras:

Dra. D<sup>a</sup>. María Jesús López Boada

Dra. D<sup>a</sup>. Beatriz López Boada

# Índice

---

<b>1. Introducción.....</b>	<b>6</b>
1.1. Objetivos.....	7
1.2. Estructura del proyecto.....	8
<b>2. El sistema de suspensión.....</b>	<b>9</b>
2.1. Componentes del sistema de suspensión.....	11
2.1.1. Elementos elásticos.....	11
2.1.1.1. Resortes helicoidales.....	12
2.1.1.2. Ballestas.....	14
2.1.1.3. Barras de torsión.....	14
2.1.2. El amortiguador.....	15
2.1.2.1. Función y componentes.....	15
2.1.2.2. Tipos de amortiguadores.....	19
2.1.2.2.1. Amortiguadores de fricción.....	19
2.1.2.2.2. Amortiguadores hidráulicos.....	20
2.1.2.2.2.1. Amortiguadores de doble tubo.....	20
2.1.2.2.2.2. Amortiguadores monotubo.....	22
2.1.2.2.3. Amortiguadores con electroválvulas.....	25
2.1.3. Otros.....	26
2.1.3.1. Barra estabilizadora.....	27
2.1.3.2. Silentblocks.....	28
2.2. Tipos de suspensión.....	28
2.2.1. Según el grado de rigidez del sistema.....	28
2.2.1.1. Sistemas de suspensión dependientes.....	29
2.2.1.1.1. Suspensión tipo “Hotchkiss”.....	29

# Índice

---

2.2.1.1.2.	Suspensión de eje rígido con resorte helicoidal.....	30
2.2.1.1.3.	Sistema de anclaje “Watt” y con barra “Panhard”...	30
2.2.1.1.4.	Sistema tipo “de Dion”.....	32
2.2.1.2.	Sistemas de suspensión independientes.....	33
2.2.1.2.1.	Suspensión independiente de brazo oscilante.....	34
2.2.1.2.2.	Suspensión con brazos tirados.....	34
2.2.1.2.3.	Suspensión independiente con brazos semi-tirados..	35
2.2.1.2.4.	Suspensión tipo McPherson.....	36
2.2.1.2.5.	Suspensión en dobles triángulos superpuestos.....	36
2.2.1.2.6.	Suspensión con sistemas multibrazos.....	37
2.2.2.	Según el sistema de control.....	38
2.2.2.1.	Suspensión pasiva.....	38
2.2.2.2.	Suspensión activa.....	39
2.2.2.3.	Suspensión semiactiva.....	40
<b>3.</b>	<b>Amortiguadores magneto-reológicos.....</b>	<b>42</b>
3.1.	Fluidos magneto-reológicos.....	43
3.1.1.	Propiedades de los fluidos magneto-reológicos.....	45
3.1.1.1.	Propiedades reológicas.....	46
3.1.1.2.	Propiedades magnéticas.....	46
3.2.	Aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos.....	47
3.3.	Amortiguadores magneto-reológicos.....	49
<b>4.</b>	<b>Modelos de amortiguadores magneto-reológicos.....</b>	<b>51</b>
4.1.	Modelos paramétricos.....	52
4.1.1.	Modelo Bouc-Wen y Bouc-Wen modificado.....	52

# Índice

---

4.1.2. Modelo Dahl modificado.....	55
4.1.3. Modelo de fricción de LuGre.....	56
4.2. Modelos algebraicos.....	57
4.2.1. Modelo de Kwok.....	57
4.2.2. Modelo Algebraico.....	58
4.2.3. Modelo Algebraico modificado.....	58
<b>5. El modelado de sistemas dinámicos.....</b>	<b>60</b>
5.1. Modelado y simulación.....	62
5.1.1. Procedimiento para la elaboración de modelos matemáticos.....	63
5.1.2. Paradigmas de modelado.....	64
5.1.2.1. Modelado modular.....	64
5.1.2.2. Modelado jerárquico.....	65
5.1.2.3. Modelado gráfico basado en bloques.....	66
5.1.2.4. Modelado acausal.....	67
5.1.2.5. Modelado orientado a objetos.....	68
5.2. Introducción a Modelica.....	70
5.2.1. Estructura de un modelo en Modelica.....	72
<b>6. Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante Modelica.....</b>	<b>75</b>
6.1. Modelo Bouc-Wen.....	79
6.1.1. Modelo Bouc-Wen simple.....	79
6.1.2. Modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa.....	81
6.2. Modelo Dahl modificado.....	84
6.2.1. Modelo Dahl simple.....	84
6.2.2. Modelo Dahl con entrada de voltaje externa.....	85

# Índice

---

6.3. Modelo algebraico.....	87
6.3.1. Modelo algebraico simple.....	87
6.3.2. Modelo algebraico con entrada de voltaje externa.....	89
<b>7. Resultados de simulación.....</b>	<b>91</b>
7.1. Modelo Bouc-Wen simple.....	92
7.2. Modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa.....	96
7.3. Modelo Dahl simple.....	103
7.4. Modelo Dahl con entrada de voltaje externa.....	104
7.5. Modelo algebraico.....	109
7.6. Modelo algebraico con entrada de voltaje externa.....	111
<b>8. Conclusiones y desarrollos futuros.....</b>	<b>116</b>
8.1. Conclusiones.....	117
8.2. Desarrollos futuros.....	117
<b>9. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>119</b>

---

## Capítulo 1

# Introducción

---

---

# Capítulo 1: Introducción

---

El sistema de suspensión de un vehículo automóvil es uno de los elementos más importantes de un vehículo. De este sistema depende la confortabilidad del vehículo y la seguridad de los pasajeros. Su misión es absorber irregularidades del terreno y mantener la rueda en contacto con el pavimento en todo momento.

Uno de los elementos más importantes de este sistema es el amortiguador, su misión es frenar las oscilaciones producidas por las irregularidades. El amortiguador es uno de los elementos que más participan en el sistema de suspensión y un buen diseño del mismo puede suponer grandes ventajas para las prestaciones del automóvil.

Durante años este elemento ha sufrido una gran evolución, desde los amortiguadores de fricción hasta los amortiguadores magneto-reológicos cuyas propiedades de amortiguación son variables y proveen al sistema de suspensión de un vehículo de mejores prestaciones en cualquier situación.

Para poder diseñar correctamente la suspensión de un vehículo y, en concreto, estos amortiguadores magneto-reológicos es necesario contar con modelos matemáticos que representen fielmente el comportamiento de los mismos.

Una de las maneras que existen para diseñar de manera óptima un sistema de suspensión y, en general, cualquier elemento o sistema mecánico es efectuar una simulación mediante un software de modelado. *OpenModelica* es un software gratuito que ofrece un entorno de simulación destinado al ámbito industrial y académico [1] con el que se puede simular sistemas de diversos tipos utilizando los elementos que ya posee en sus librerías o programando nuevos elementos.

## **1.1. Objetivos**

Los principales objetivos de este proyecto fin de carrera son:

- Programar algunos de los modelos matemáticos que existen para representar el comportamiento de los amortiguadores magneto-reológicos
- Simular el comportamiento de dichos amortiguadores mediante un sistema dinámico para obtener las curvas de un amortiguador:
  - Fuerza vs desplazamiento.
  - Fuerza vs velocidad.

# Capítulo 1: Introducción

---

- Comparar los resultados que se han obtenido con *Modelica* con los que se han obtenido mediante *Simulink*

## **1.2. Estructura del proyecto**

El presente proyecto fin de carrera consta de 8 capítulos, siendo el primero de ellos la presente introducción.

En el capítulo 2: Se introduce el sistema de suspensión, así como los elementos de los que consta y los tipos de sistemas atendiendo a diversas clasificaciones.

En el capítulo 3: Se trata el amortiguador magneto-reológico, los fluidos magneto-reológicos y sus aplicaciones.

En el capítulo 4: Se exponen los diferentes modelos de caracterización del comportamiento de los amortiguadores magneto-reológicos.

En el capítulo 5: Se introduce el modelado de sistemas dinámicos, más en concreto el modelado de sistemas dinámicos en *Modelica*.

En el capítulo 6: Se exponen los códigos programados en lenguaje *modelica* para los diferentes modelos de amortiguadores magneto-reológicos.

En el capítulo 7: Presenta los resultados obtenidos de la simulación de los diferentes sistemas dinámicos con sus respectivos modelos, además se compara los resultados con los obtenidos mediante *Simulink*.

En el capítulo 8: Se exponen las conclusiones del proyecto además se dan ideas para desarrollos de cara al futuro.



---

## Capítulo 2

# El sistema de suspensión

---

---

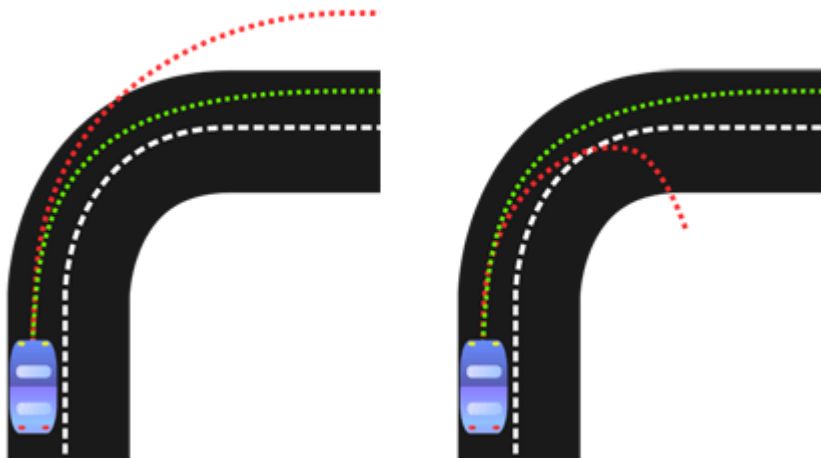
## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

La suspensión de un vehículo tiene como cometido absorber las desigualdades del terreno sobre el que se desplaza, a la vez que mantiene las ruedas en contacto con el pavimento, proporcionando un adecuado nivel de confort y seguridad de marcha. Las funciones básicas son las siguientes:

- Reducción de las fuerzas causadas por las irregularidades del terreno.
- Control de la dirección del vehículo.
- Mantenimiento de la adherencia de los neumáticos a la carretera.
- Mantenimiento de una correcta alineación de las ruedas.
- Soporte de la carga del vehículo.
- Mantenimiento de la altura óptima del vehículo.

El comportamiento del vehículo se determina en gran medida por el tipo de suspensión que lleve. Así por ejemplo, mediante su reglaje es posible variar la característica del coche (subvirador / sobrevirador). En la figura 2.1 se aprecia a la izquierda la trayectoria normal (verde) y la trayectoria de un vehículo subvirador (rojo), a la izquierda se aprecia la trayectoria normal y la de un vehículo sobrevirador.



*Figura 2.1: Comportamiento en curva de un vehículo, a la izquierda vehículo subvirador y a la derecha vehículo sobrevirador*

El peso del vehículo se descompone en dos partes denominadas:

- Masa suspendida: la integrada por todos los elementos cuyo peso soporta el bastidor o chasis.

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

- Masa no suspendida: constituida por el resto de los componentes como los sistemas de freno.

El enlace entre ambas masas es materializado por la suspensión. El sistema está compuesto por un elemento elástico, cuya función es la de mantener el contacto de la rueda con el pavimento, que puede ser una ballesta, un muelle helicoidal, una barra de torsión etc. y otro elemento de amortiguación, en este caso, el amortiguador en cualquiera de sus versiones. La misión del amortiguador es neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida originadas por el elemento elástico al adaptarse a las irregularidades del terreno transformando la energía que almacena el resorte en calor [2], [3].

### **2.1. Componentes del sistema de suspensión**

Los elementos que componen un sistema de suspensión tradicional son los siguientes:

- Elementos elásticos.
- Elementos amortiguadores.
- Otros.
  - Barra estabilizadora.
  - Brazos de suspensión.
  - Bieletas de empuje.
  - Silentblocks.

Todos estos elementos actúan de manera directa en mayor o menor grado en la transmisión de las oscilaciones del camino y en las generadas por el propio movimiento del vehículo, a los pasajeros y a la carga. Dependiendo del tipo de vehículo que se estudie, habrá elementos inexistentes, sin esta función o con otros elementos que hagan estas funciones. Por ejemplo en algunos vehículos agrícolas, la amortiguación la realiza la deformación del neumático y las oscilaciones del asiento [4].

#### **2.1.1. Elementos elásticos**

El elemento elástico, o resorte, de una suspensión es el que tiene el efecto que da nombre a la suspensión: es el elemento que tiene suspendido sobre él todo el cuerpo del

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

coche, por ello se llama ‘masa suspendida’. Además de la función de sostener el peso del coche, también tiene la misión de absorber la energía que se produce cuando la rueda se desplaza verticalmente, para liberar esa energía posteriormente con el fin de devolver la rueda a su posición original. Puede configurarse su rigidez y recorrido para un mejor control de la rueda y la carrocería, que también ayudan a controlar el balanceo, o para ofrecer mayor comodidad

Este elemento elástico puede tener diferente naturaleza dependiendo del tipo de vehículo que se trate:

- Resortes helicoidales.
- Ballestas.
- Barras de torsión.
- Combinaciones de ellos.

### *2.1.1.1. Resortes helicoidales*

Los resortes helicoidales son los elementos de soporte más empleados en automóviles ligeros, su estructura consta de un alambre grueso de acero arrollado como si fuera un cilindro en espiral ascendente, generalmente de diámetro y paso constantes. Una de sus características principales radica en que su distancia de compresión es proporcional a la carga que se les aplica.

Estas características hacen que sean elementos útiles en las suspensiones de automóviles de pasajeros y en los ejes delanteros de camiones ligeros, donde la carga novaría de manera notable entre el vehículo vacío y cargado. En los camiones pesados estos elementos no son apropiados ya que se fabrican de acuerdo al peso máximo y por tanto en la situación de camión en vacío puede ser una suspensión muy rígida.

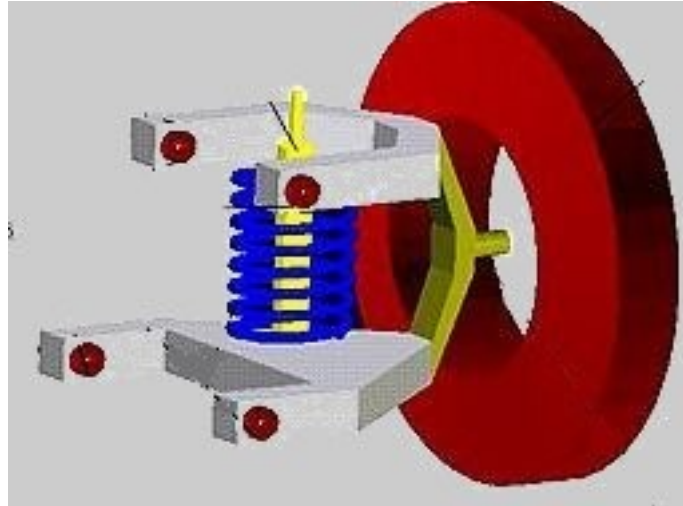
Otra ventaja que poseen es la relación entre tamaño y carga que soportan. La desventaja más notoria que poseen respecto a otros elementos es que no poseen un mecanismo de sujeción entre el eje de las ruedas y la carrocería, por lo que deben ir acompañados de unos tensores de agarre para tal fin.

En la figura 2.2 se muestra un montaje típico de un muelle en espiral, el resorte se encuentra montado dentro de un mecanismo de palancas en forma de horquillas que

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

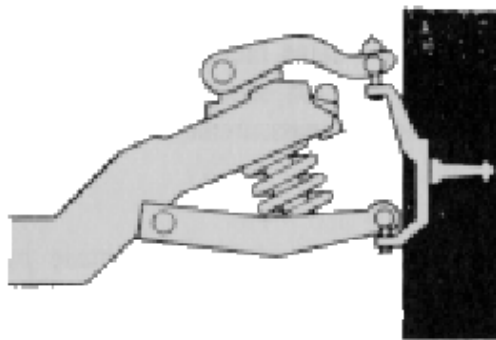
---

unen el eje de la rueda al vehículo a través de los puntos de pivote que posee cada una de las horquillas. Esto hace que se pueda producir movimiento relativo en dirección vertical y no en horizontal, lo que garantiza la unión en las frenadas.



*Figura 2.2: Resorte helicoidal en un sistema de suspensión*

En la figura 2.3 se muestra el montaje de un resorte helicoidal montado sobre un eje saliente en la rueda delantera en cuyos extremos hay articulaciones de bola que se acoplan a las horquillas del mecanismo. Esas articulaciones permiten el movimiento relativo adecuado con las horquillas tanto en dirección vertical [5].



*Figura 2.3: Vista frontal de un montaje de un resorte helicoidal*

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

### 2.1.1.2. Ballestas

Las ballestas son utilizadas en vehículos de carga por su simplicidad y larga duración, las ballestas están formadas por una superposición de hojas de acero de diferente longitud como se aprecia en la figura 2.4.



*Figura 2.4: Vista lateral de una ballesta*

Estos elementos elásticos funcionan como una placa curvada que se flexiona al aplicar una carga, este tipo de geometría es más ligera que una placa plana más ancha por el centro y terminada en punta ya que se pretende ahorrar espacio y peso por tanto se utiliza una mayor cantidad de material en la zona de mayor exigencia, la central.

Los elementos de la hoja más larga o maestra se doblan en su extremo para formar un cilindro pequeño que permita unirla al vehículo utilizando un casquillo de goma [5].

### 2.1.1.3. Barras de torsión

La barra de torsión como elemento elástico de la carga es también muy utilizada. En este caso la rueda se monta en un mecanismo oscilante que pivota en algún punto de la unión a la carrocería tal y como pasa en el caso de los resortes helicoidales. Se trata de una pieza pivotante para moverse respecto a la carrocería tiene que torcer una barra de acero templado fija en el otro extremo al vehículo. El peso del automóvil mantiene la barra parcialmente torcida con los aumentos y disminuciones de carga al transitar por irregularidades la barra absorbe los movimientos verticales del neumático.

Estas barras se pueden colocar transversal o longitudinalmente al vehículo.

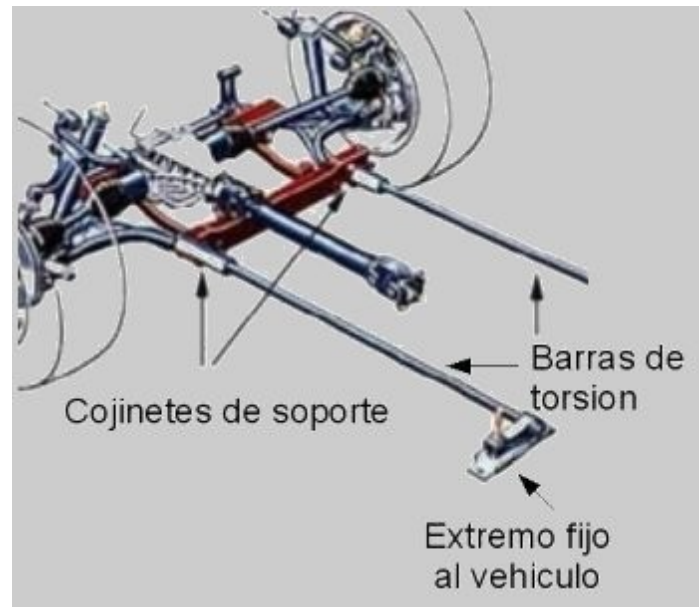
En la figura 2.5 se observa el esquema de montaje de una suspensión delantera con barras de torsión longitudinales al vehículo. Cada rueda se encuentra montada en una horquilla que pivota en dos puntos y esta acoplada a su vez al extremo curvo de una barra de torsión de manera que la barra debe curvarse para poder moverse en sentido

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

vertical. El otro extremo de la barra de torsión se encuentra rígidamente unido al bastidor.



*Figura 2.5: Esquema en perspectiva de una suspensión con barras de torsión*

La utilización de las barras de torsión facilita el paso de las barras de transmisión del movimiento a la rueda [5].

### *2.1.2. El amortiguador*

El amortiguador nació de un mecanismo que se instalaba en bicicletas, eran unos simples brazos unidos mediante un tornillo con un disco de fricción entre ellos. La resistencia se ajustaba apretando o aflojando el tornillo. Estos amortiguadores de fricción tenían muchas desventajas respecto a los actuales amortiguadores hidráulicos.

#### *2.1.2.1. Funciones y componentes*

La función de un amortiguador es conseguir frenar parcial o totalmente un desplazamiento no deseado que aparece en un sistema. Los amortiguadores de los automóviles no deben únicamente cumplir esta función, si no que requieren un funcionamiento que cumpla con los requerimientos de seguridad y confort del vehículo.

Para llevar a cabo su función y frenar el movimiento de una masa, un amortiguador tiene que ejercer una fuerza de sentido opuesto a la que ejerce la masa

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

sobre él, en el caso de un amortiguador la fuerza que se opone al movimiento es la de fricción entre sus elementos.

En un amortiguador se pueden distinguir varios tipos de fuerzas de fricción:

- Fricción de Coulomb: Debida al movimiento relativo entre partes sólidas en contacto.
- Fricción viscosa: Asociada al movimiento del fluido.
- Fricción turbulenta: Aparece con la formación de flujo turbulento en el interior del amortiguador.

En el caso de los amortiguadores utilizados en automóviles la fuerza debe ser función de la velocidad y por tanto se utiliza la fricción viscosa asociada al movimiento del fluido. A este tipo de amortiguadores se les denomina amortiguadores hidráulicos.

La principal función que tiene esta fuerza opositora es la de mantener siempre el neumático en contacto con el pavimento. Además, el amortiguador debe proporcionar el máximo confort a los pasajeros y al conductor, para ello trata de eliminar de la forma más eficaz posible todo tipo de vibraciones.

El principio de funcionamiento de los amortiguadores convencionales se basa en la conversión de energía cinética proveniente del movimiento en energía térmica que se disipa en forma de calor. Esto se consigue provocando una restricción al movimiento del fluido dentro del amortiguador, es decir, disminuir el área de paso, de esta forma el fluido genera una fuerza debido al cambio en sus características.

La dificultad de este proceso radica en la consecución de la fuerza deseada en función de las necesidades de cada momento.

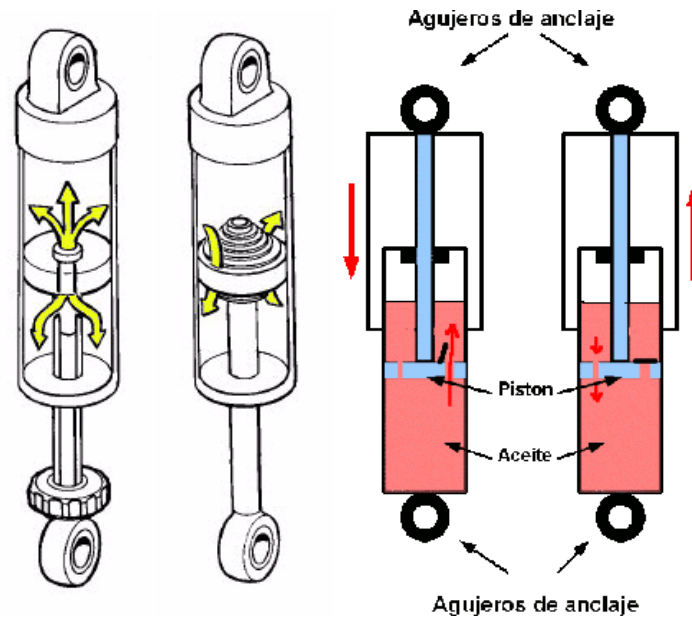
Los amortiguadores básicamente constan de un cilindro en el que hay un fluido (generalmente aceite). Sobre el pistón existen una serie de orificios y unas válvulas precomprimidas que permiten el paso del fluido de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor dado. Los orificios representan el paso permanente y las válvulas el paso de apertura por presión, respectivamente.



## Capítulo 2: El sistema de suspensión

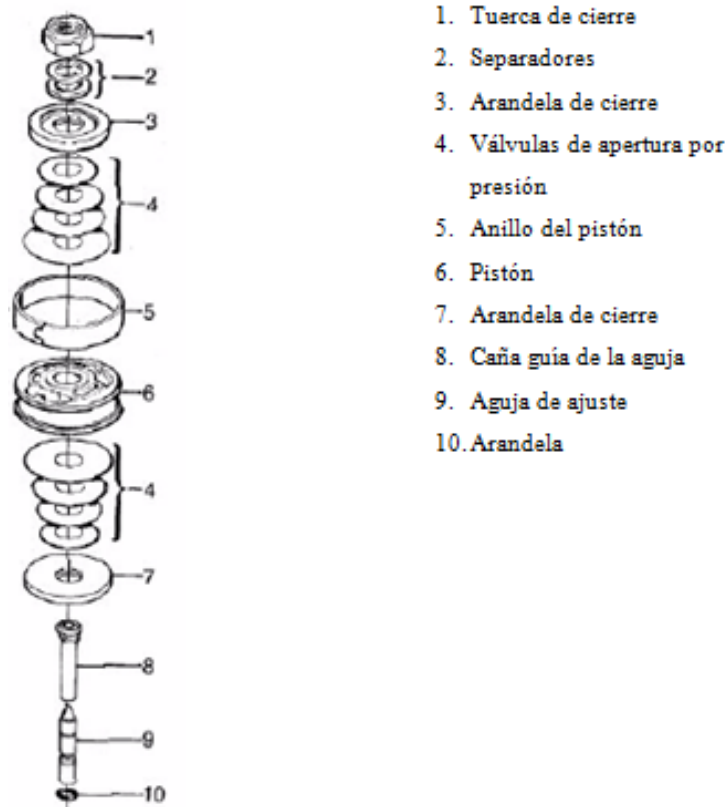
---

El caudal que pasa por los orificios que representan el paso permanente de fluido depende únicamente del tamaño de los mismos, en el caso del paso por presión, las válvulas necesitan que se ejerza sobre ellas una determinada fuerza. La Figura 2.6 muestra un esquema de flujo a través de los orificios y las válvulas en un amortiguador hidráulico.



*Figura 2.6: Esquema de flujo a través de los orificios y las válvulas respectivamente*

La Figura 2.7 muestra los elementos tradicionales de un amortiguador:



*Figura 2.7: Plano explosionado de un amortiguador*

Cuando la velocidad entre ambos extremos del amortiguador es baja, las válvulas de apertura por presión permanecen cerradas y el fluido pasa a través de los orificios de paso permanente. Una vez la presión del fluido alcanza la de tarado de las válvulas de presión, las válvulas se abren más hasta que su apertura es completa y la ley de fuerza en el amortiguador queda controlada por el paso del fluido a través del orificio del apertura por presión.

Lo normal es que las válvulas de extensión y compresión sean diferentes, lo que posibilita que el esfuerzo en compresión sea menor para una misma velocidad. En los vehículos de carretera, interesa utilizar una característica de amortiguamiento más blanda en compresión. Esto se hace para evitar la transmisión a través del amortiguador de las grandes fuerzas compresivas que se generarían en el mismo cuando la rueda se encuentra con un obstáculo [2].

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

### 2.1.2.2. Tipos de amortiguadores

A lo largo de la historia los amortiguadores han ido evolucionando y se han utilizado muy diversos tipos:

- Amortiguadores de fricción.
- Amortiguadores hidráulicos.
- Amortiguadores con electroválvulas.
- Amortiguadores magneto-reológicos.

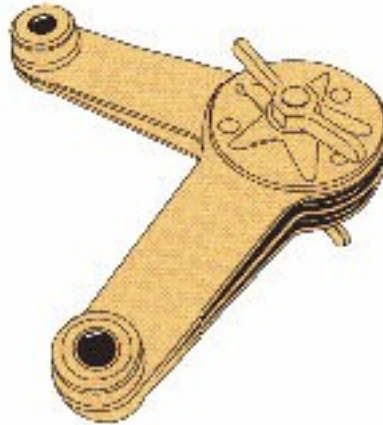
#### 2.1.2.2.1. Amortiguadores de fricción

Los amortiguadores de fricción o rozamiento, poseen dos brazos, uno fijo acoplado a la carrocería del vehículo y otro móvil acoplado al mecanismo de la rueda. Consta además de unos discos separados por un material de fricción comprimidos por una pieza de acero templado que funciona como un resorte de diafragma. La unión del conjunto la mantiene un perno que tiene como función adicional la de comprimir más o menos el resorte del diafragma y así obtener mayor resistencia por fricción al movimiento relativo entre los brazos, es decir hacer más o menos rígido el comportamiento del amortiguador. En la Figura 2.8 se aprecia el aspecto de un amortiguador de fricción.

Este amortiguador trabaja cuando las excitaciones a las que se encuentra sometido el vehículo hacen que las ruedas suban o bajen provocando con ello la compresión de los muelles. Esto permite acabar con las oscilaciones libres del sistema aportando confort.

Estos amortiguadores son de doble acción, se oponen al movimiento relativo de las ruedas respecto al bastidor en ambas direcciones, cuando la rueda sube y también cuando baja. Este doble efecto es en ocasiones indeseable puesto que endurecen la suspensión. El material de fricción se encuentra continuamente sometido a esfuerzos que hacen que este tipo de amortiguadores no sean muy duraderos.

A día de hoy este tipo de amortiguadores ha caído en desuso y en su lugar se utilizan los amortiguadores hidráulicos [4].



*Figura 2.8: Amortiguador de fricción*

### 2.1.2.2.2. Amortiguadores hidráulicos

Los amortiguadores hidráulicos, se dividen normalmente en dos tipos, los de un solo tubo y los de doble tubo.

#### 2.1.2.2.2.1. Amortiguadores de doble tubo

Los amortiguadores de doble tubo pueden ser de dos clases, presurizados, cuyo fluido suele ser aceite y no presurizados, cuyo fluido puede ser un gas o un aceite. Constan de dos cámaras:

- Cámara interior.
- Cámara de reserva.

Poseen además válvulas en el pistón y en la base del amortiguador. Los componentes principales comunes a ambos tipos son:

- Tubo y cámara exterior o de reserva.
- Tubo y cámara interior o cilindro.
- Pistón.
- Válvula de pie.
- Guía del vástago.
- Acoplamiento superior e inferior.

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

La Figura 2.9 muestra tres planos de corte de tres amortiguadores de doble tubo, en sus variantes presurizado y no presurizado.

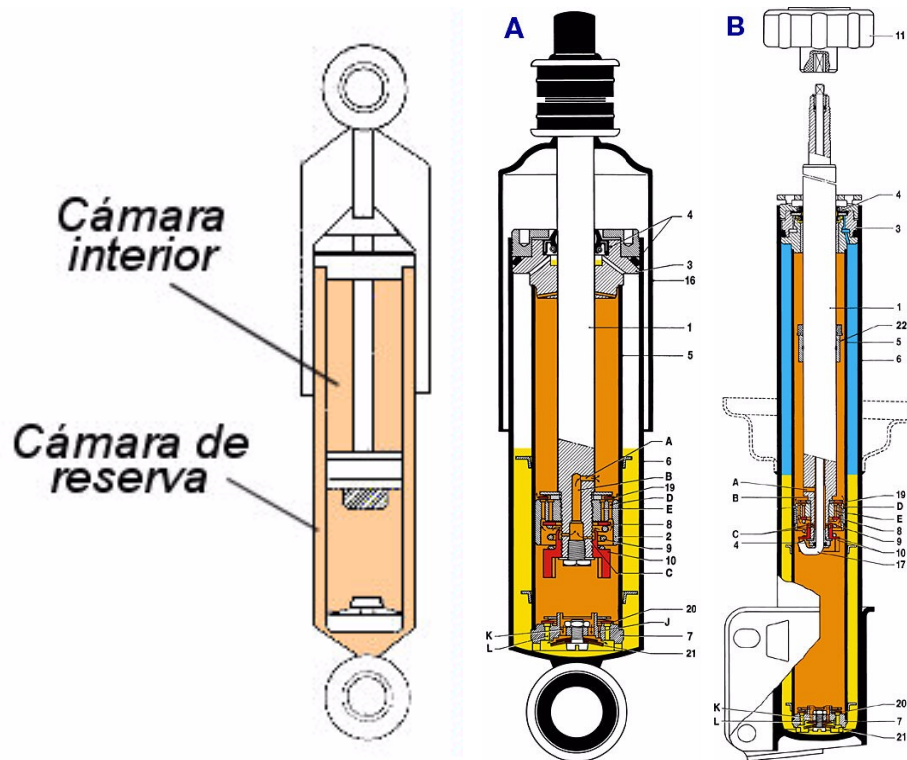


Figura 2.9: Esquema de un amortiguador bitubo: A no presurizado, B presurizado

El funcionamiento del amortiguador bitubo consta de dos carreras:

- Carrera de compresión: El vástago penetra en el fluido de la cámara interior y fluye sin resistencia a través de los orificios y la válvula de no-retorno hacia el espacio al otro lado del pistón. Simultáneamente, una cierta cantidad de fluido se ve desplazada por el volumen que el vástago va ocupando en la cámara interior. Este fluido pasa por la válvula de pie de manera forzada hacia la cámara de reserva (Llena de aire o de gas a presión). La fuerza de amortiguamiento viene dada por la resistencia que impone la válvula de pie al paso del fluido.
- Carrera de extensión: Al tirar del vástago hacia fuera el aceite que queda por encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el fluido encuentra en dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión. El fluido que había llegado de la cámara de

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

reserva vuelve sin hallar resistencia por la válvula de pie a la cámara interior para compensar el volumen liberado por el vástago.

- No presurizados

Los amortiguadores no presurizados poseen una desventaja respecto a los presurizados, ya que se pueden formar bolsas de aire bajo en determinadas condiciones:

- En posición horizontal.
- La columna de fluido de la cámara principal cae por acción de la gravedad tras un periodo de equilibrio mantenido.
- El fluido se contrae debido a su enfriamiento y se succiona aire hacia la cámara principal.

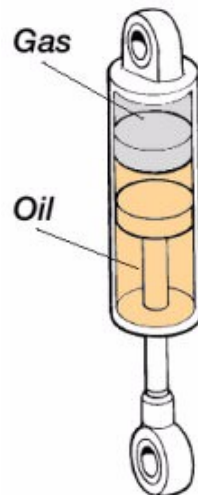
- Presurizados

Los amortiguadores presurizados poseen un tipo de configuración que mejora las prestaciones de los amortiguadores bitubo convencionales. La solución consiste en añadir una cámara de gas a baja presión, la fuerza de compresión la sigue proporcionando la válvula de pie. De esta forma, la fuerza de extensión realizada por el amortiguador en su posición nominal es baja. Esto permite utilizar diámetros más elevados. Posee ciertas ventajas respecto a los no presurizados:

- Respuesta de la válvula más sensible para pequeñas amplitudes.
- Mejor confort de marcha.
- Mejores propiedades de amortiguación.
- Reducción de ruido.
- Operatividad pese a pérdidas de gas.
- Menor longitud y fricción a igualdad de condiciones.

### 2.1.2.2.2. Amortiguadores monotubo

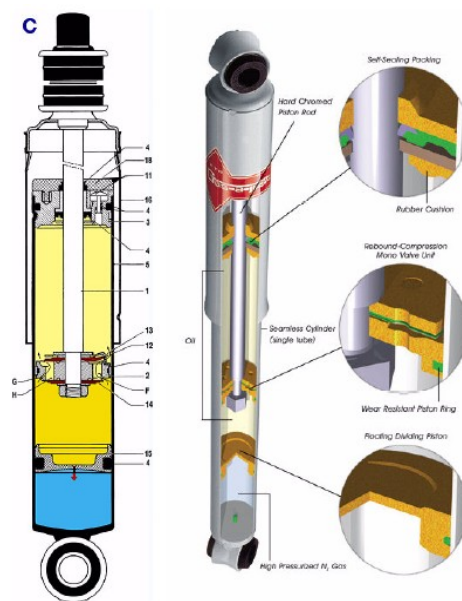
Los amortiguadores monotubo aparecen después de los bitubo y se utilizan en vehículos de altas prestaciones. Constan de dos cámaras principales (figuras 2.10 y 2.11) una con el fluido y otra con gas a presión, separadas por un pistón flotante donde se encuentran las válvulas.



*Figura 2.10: Esquema de un amortiguador monotubo*

Los componentes de los que consta son:

- Tubo de presión.
- Pistón acoplado al vástago.
- Pistón flotante.
- Guía del vástago.
- Acoplamientos superior e inferior.



*Figura 2.11: Esquema completo de un amortiguador monotubo*

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

El funcionamiento del amortiguador monotubo es ligeramente diferente al que tiene el amortiguador bitubo aunque consta de las mismas carreras [2]:

- Carrera de compresión: A diferencia del bitubo el amortiguador monotubo no tiene cámara de reserva. El problema de ubicar el fluido que ocupa el espacio tomado por el vástago al penetrar se soluciona con una cámara de volumen variable. Mediante el pistón flotante se consigue dividir la cámara inferior en dos zonas una la del fluido y la otra con gas presurizado a alta presión. Al empujar el vástago hacia dentro la presión que ejerce el fluido sobre dicho pistón flotante hace que la zona de gas se comprima, aumentando la presión a ambos lados. De esta manera el fluido se ve obligado a pasar a través de las válvulas del pistón. La fuerza de amortiguamiento es función de la resistencia que encuentre el fluido a su paso por estas válvulas.
- Carrera de extensión: Al tirar del vástago hacia fuera, el fluido que queda encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el fluido encuentra en dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión. Debido a la disminución de la presión en la cámara, el pistón flotante vuelve hacia arriba recobrando su posición original y compensando el volumen liberado por el vástago.

Las ventajas de los amortiguadores monotubo frente a los bitubo son:

- Mejor refrigeración gracias a que la cámara tiene contacto directo con el aire, esto supone más eficacia a la hora de disipar la energía cinética.
- Mayor diámetro de pistón con el mismo diámetro de carcasa, lo que supone reducir las presiones a las que se somete.
- El nivel del fluido no baja en equilibrio, evitando problemas en la puesta en marcha.
- No posee problemas de cavitación ya que el fluido no forma espuma ni en vibraciones de alta frecuencia.
- Posibilidad de colocarse en posición horizontal.

Sin embargo poseen ciertas desventajas:

- Mayor precio.



## Capítulo 2: El sistema de suspensión

- Válvulas más complejas.
- Dificultad de regulación de la suspensión.

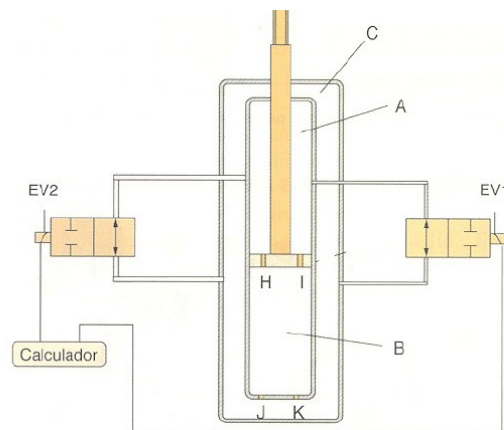
### 2.1.2.2.3. Amortiguadores con electroválvulas

Los amortiguadores de electroválvulas permiten variar, a voluntad del conductor, los pasos calibrados de aceite entre las cámaras, de manera que se puede conseguir una suspensión más segura pero menos confortable o menos segura pero más confortable según los requerimientos del vehículo en cada momento.

Las electroválvulas se encuentran conectadas a una centralita electrónica de donde reciben diversa información del vehículo, por ejemplo, la velocidad del vehículo, aceleraciones longitudinales, verticales y transversales etc.

Las informaciones que recibe de los sensores son analizadas por el calculador electrónico que compara estas informaciones con los valores que tiene almacenados en su interior. Cuando sobrepasa alguno de estos valores actúa sobre las electroválvulas y hace variar los orificios calibrados del amortiguador.

Este amortiguador está compuesto por tres cámaras (A, B y C) como muestra la figura 2.12 que están unidas por pequeños orificios, así tenemos que la cámara A y B están unidas por los orificios H e I, la B y la C con los pequeños orificios J y K y las cámaras A y C que se pondrán en comunicación cuando actúen las dos electroválvulas EV1 y EV2. Las electroválvulas son pilotadas por el calculador electrónico que ordena su apertura y cierre en función de los parámetros que recibe de los sensores.



*Figura 2.12: Esquema de un amortiguador con electroválvulas*

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

El comportamiento del vehículo es diferente según la acción de las electroválvulas en cada momento:

Se comportará de manera confortable cuando la electroválvula EV1 esté cerrada y la electroválvula EV2 abierta. Se permite el paso de aceite de la cámara A a la B por los orificios H e I, también de la cámara A a la C por la electroválvula EV2 que las comunica, y finalmente de la cámara B a la cámara de compensación C por los pequeños pasos J y K.

Para una suspensión algo más dura, permanece cerrada la EV2 y se abre la EV1 que al tener los pasos de la A a la C más pequeños, le cuesta un poco más pasar al aceite de una cámara a otra.

Por último, para una suspensión deportiva las dos electroválvulas permanecen cerradas de modo que se corta la comunicación entre las cámaras A y C por las electroválvulas y sólo permanece la comunicación entre A y B y entre B y C. De esta forma, el recorrido del émbolo es frenado en sus movimientos de compresión y distensión debido a la dificultad del paso de aceite por los orificios H e I. Se consigue así un tarado muy duro con gran estabilidad pero con disminución del confort [6].

Este tipo de amortiguadores tienen la ventaja de poder cambiar el coeficiente de amortiguación según las propiedades del terreno o las especificaciones requeridas, pero por el contrario necesitan ser alimentados con electricidad para el funcionamiento de los sensores y las electroválvulas, por este motivo, su uso queda restringido a vehículos de gran potencia. La alternativa a este tipo de amortiguadores son los amortiguadores magneto-reológicos ya que poseen la ventaja de poder cambiar su coeficiente de amortiguamiento según las condiciones pero sin necesidad de ser alimentados y con más ventajas que se exponen en el capítulo 3.

### 2.1.3. Otros

Los elementos que se describen a continuación en los apartados 2.1.3.1 y 2.1.3.2, son elementos que no aparecen en todos los sistemas de suspensión, por tanto, no son esenciales para el correcto funcionamiento del mismo.

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

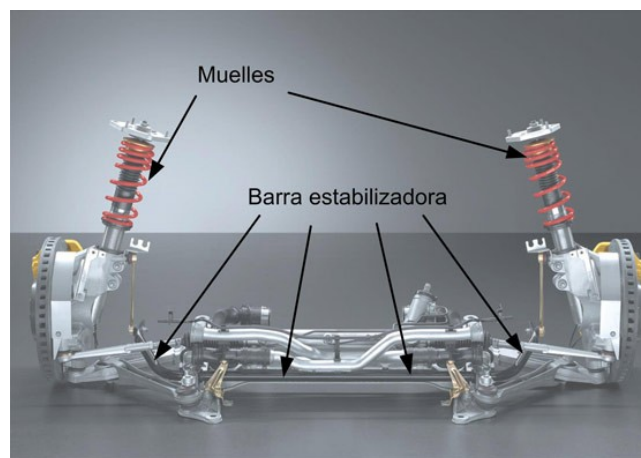
---

### 2.1.3.1. La barra estabilizadora

La barra estabilizadora es un elemento que no está siempre presente en un sistema de suspensión, las ventajas que aporta este elemento afectan a la estabilidad del vehículo.

La barra estabilizadora es un cilindro de acero con forma de U conectada en un extremo al mecanismo de suspensión de un lado del vehículo y en el otro extremo al otro lado del mecanismo de suspensión de la otra rueda. Esta barra transfiere una parte de la carga adicional aplicada a la suspensión de un lado, a la suspensión del otro lado, cuando el vehículo se encuentra describiendo un giro, de esta forma se reduce notablemente la inclinación de la carrocería y por tanto los esfuerzos a los que se le somete.

La barra estabilizadora se monta en unos soportes anclados al bastidor que permiten su rotación como se muestra en la figura 2.13.



*Figura 2.13: Esquema del montaje de una barra estabilizadora*

El tipo de barra más común se encuentra en el sistema de suspensión delantera de los automóviles, ya que cuando el vehículo toma una trayectoria curva la carrocería tiende a inclinarse hacia el exterior. Esto produce un aumento en la magnitud de la fuerza a la que se someten las ruedas de la parte exterior de la trazada, esta fuerza se traduce en un mayor esfuerzo aplicado en la suspensión y una descarga de las ruedas internas a la trazada. Por ello se observa una compresión del lado externo a la curva y una extensión del lado interno.

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

El efecto producido por la barra estabilizadora puede provocar la pérdida de contacto con el firme de las ruedas internas. La elasticidad asociada a la barra determina cuan efectiva es para contrarrestar la inclinación del vehículo. Esta elasticidad típicamente va unida al diámetro de la barra. Se debe buscar el valor óptimo de elasticidad ya que poca elasticidad puede provocar que no se transfiera la suficiente fuerza a la otra rueda y mucha elasticidad puede provocar un exceso de perturbación en la otra rueda ante esfuerzos de poca intensidad [4], [5].

### 2.1.3.2. *Silentblocks*

El silentblock es un elemento de caucho u otro material elastómero que se encarga de amortiguar y minimizar las reacciones en los apoyos de la suspensión, el lugar más común donde se encuentran es entre las rotulas [5].

## 2.2. **Tipos de suspensión**

Atendiendo a diversos aspectos, existen varios tipos de clasificación de los sistemas de suspensión:

- Según el grado de rigidez del sistema.
- Según el sistema de control.

### 2.2.1. *Según el grado de rigidez del sistema*

Según el grado de rigidez del sistema, el sistema de suspensión se puede clasificar en:

- Eje rígido o dependiente: El sistema de suspensión en el que hay un elemento no flexible que une las ruedas de cada lado de forma independiente.
- Semi-independiente: Existe un cierto grado de dependencia en la deformación de las ruedas de cada lado.
- Independiente: Aquella en la que no hay una unión rígida entre las ruedas de un mismo eje.

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

### 2.2.1.1. *Sistemas de suspensión dependientes*

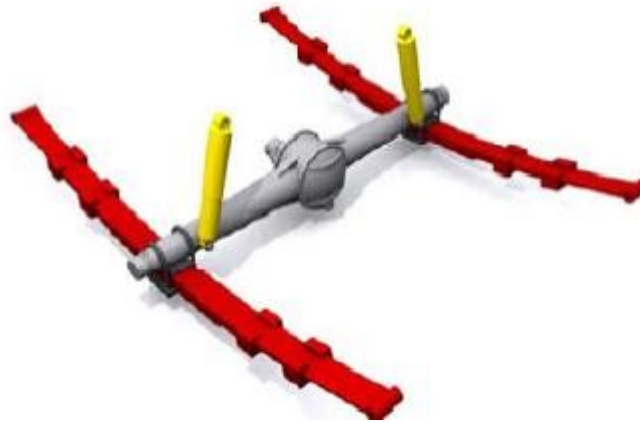
Los sistemas de suspensión dependientes poseen una gran robustez y presenta una gran capacidad de transporte de carga. En este tipo de suspensiones, el ángulo de caída no se ve afectado por el movimiento de balanceo de la carrocería.

Debido a la gran rigidez de este tipo de suspensiones provoca que una excitación en una rueda origina un desplazamiento y un momento giroscópico en la rueda opuesta de manera que puede afectar a la dirección. Los vehículos muestran inestabilidad durante el frenado. Reducción del ángulo de avance durante el frenado. Posee menor rigidez antibalanceo que en suspensiones independientes por tanto los resortes son más rígidos para corregir esta desventaja. Este tipo de suspensiones ocupa demasiado espacio [7]. A continuación se discuten las configuraciones de los sistemas de suspensión de eje rígido más comúnmente utilizados.

#### 2.2.1.1.1. Suspensión tipo “Hotchkiss”

La suspensión tipo “Hotchkiss” consta de un eje rígido con el diferencial integrado, su unión con el bastidor se efectúa mediante ballestas ancladas en su punto medio. El elemento amortiguante son dos amortiguadores hidráulicos. La figura 2.14 muestra la configuración tradicional de una suspensión “Hotchkiss”.

El sistema proporciona estabilidad en sentido vertical, para que la ballesta funcione como resorte, pero no hay una sujeción en dirección lateral lo que provoca que el chasis se encuentre sometido a esfuerzos de torsión. Es un sistema que no posee una gran eficacia y por tanto su uso es único para vehículos donde el comportamiento dinámico es irrelevante y se busca un sistema económico.



*Figura 2.14: Esquema de una suspensión tipo “Hotchkiss”*

### 2.2.1.1.2. Sistema de eje rígido con resorte helicoidal

El sistema de suspensión de eje rígido con resorte helicoidal prescinde de la ballesta y por tanto del elemento fijador de la rueda, en este caso la solución se propone con la aparición de dos brazos longitudinales que sirven para guiar a las ruedas, se utilizan además resortes helicoidales como elementos elásticos como se aprecia en la figura 2.15.



*Figura 2.15: Esquema de una suspensión de eje rígido con resorte helicoidal*

### 2.2.1.1.3. Sistema de anclaje “Watt” y con barra “Panhard”

El anclaje Watt consiste en dos barras horizontales de igual longitud montadas a cada lado del chasis. Se unen mediante una barra vertical, cuyo centro articula con el

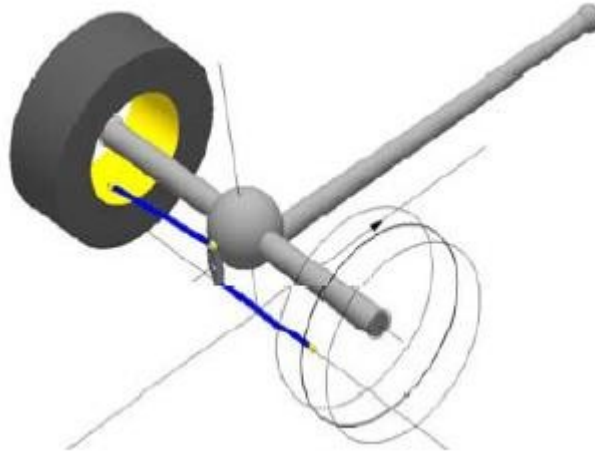
---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

punto central del eje como se aprecia en la figura 2.16. Todas las articulaciones permiten la rotación en el plano vertical.

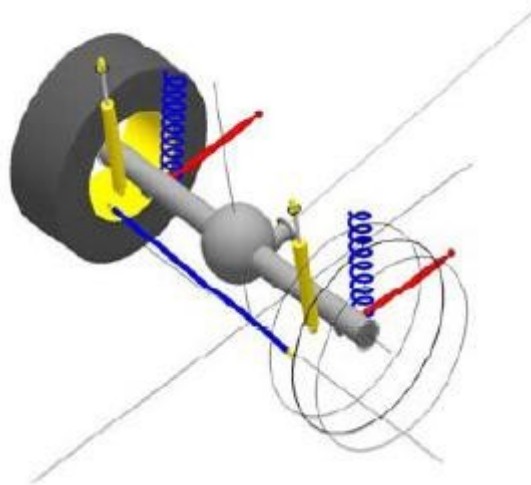
Este anclaje permite que el eje tenga una trayectoria más aproximada a una línea recta por lo tanto es más eficaz que el sistema con barra “Panhard” pero encierra mayor complejidad.



*Figura 2.16: Esquema de suspensión con anclaje “Watt”*

La barra “Panhard” consiste en una barra rígida dispuesta de lado en el plano del eje, conecta en un extremo el eje con el bastidor como se aprecia en la figura 2.17. El anclaje de estos puntos permite a la barra girar moviéndose en el plano vertical.

Este sistema no ejerce un control efectivo en dirección longitudinal por lo que se suele usar con otro tipo de suspensión. Posee la ventaja de ser muy simple y ligera además de ser muy efectiva. El único problema es que la barra debe ser lo más larga posible para evitar movimientos del chasis.



*Figura 2.17: Esquema de suspensión con barra “Panhard”*

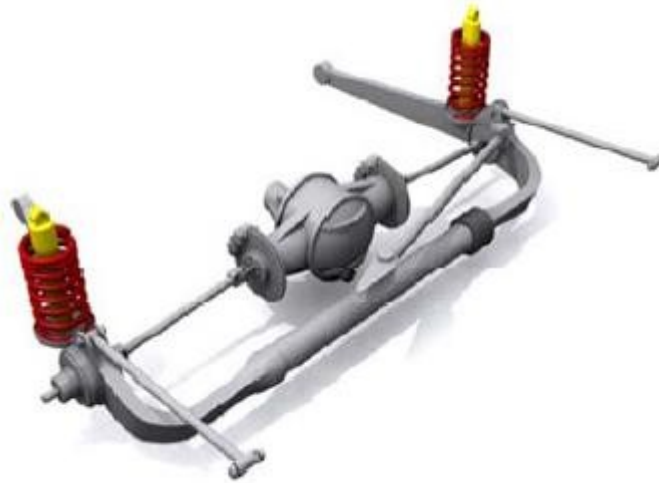
#### 2.2.1.1.4. Sistema tipo “de Dion”

El sistema tipo “de Dion” se compone de un diferencial, palieres montados en el chasis y un tubo lateralmente telescópico que une las dos ruedas al eje. La figura 2.18 muestra la configuración de este tipo de suspensión.

Este sistema combina las ventajas de un eje rígido de mantener el ángulo de caída constante y además disminuye las masas no suspendidas como en la suspensión independiente. Por el contrario, es una solución bastante compleja por que requiere mayor número de juntas para los palieres y si no se usan ballestas se debe también recurrir a métodos como los utilizados en el caso de eje rígido con resorte helicoidal para el control de las ruedas, por tanto el conjunto final puede no ser tan ligero como parece.

Además posee la desventaja de que aunque solo una rueda se encuentre con una perturbación en el terreno el sistema “Dion” reproduzca la misma en la rueda del lado contrario [8].





*Figura 2.18: Esquema de suspensión rígida “Dion”*

### *2.2.1.2. Sistemas de suspensión independientes*

La principal característica de un sistema de suspensión independiente es que el movimiento vertical de cada rueda es independiente del que tenga la rueda del lado contrario del mismo eje.

La suspensión independiente permite mejor absorción de impactos y mayor estabilidad en condiciones irregulares, por lo tanto consigue una mejora notable de la comodidad y el comportamiento del vehículo en condiciones adversas. Esta suspensión consigue mayor rigidez a balanceo que una suspensión rígida utilizando el mismo resorte.

En el eje delantero elimina problemas de vibraciones asociadas al sistema de dirección y además posee una estructura más compacta y con menor masa no suspendida [7].

A continuación se discuten las configuraciones de los sistemas de suspensión de eje independiente más comúnmente utilizados.

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

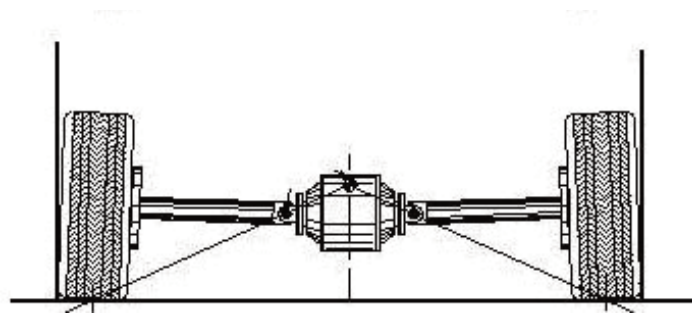
---

### 2.2.1.2.1. Suspensión independiente de brazo oscilante

El sistema de suspensión de brazo oscilante es el método más simple de obtener una suspensión independiente. Cada eje se divide en dos formando dos semiejes independientes conectando cada rueda con el diferencial o con el chasis en el centro.

Esta suspensión mejora su efectividad cuanto más largos sean los semiejes, es decir que lleguen al punto medio del eje. Esto permite minimizar uno de los problemas que conlleva este tipo de suspensión que es la variación del ángulo de caída que se produce en las ruedas durante el movimiento vertical, además este problema puede conllevar el levantamiento de la carrocería del vehículo.

Por tanto, desde el punto de vista dinámico, este sistema no es muy adecuado pero posee como ventajas una gran simplicidad y bajo coste de ejecución.



*Figura 2.19: Suspensión independiente de brazo oscilante*

En la figura 2.19 se aprecia la configuración del sistema de suspensión con brazo oscilante, además aparece dibujado el centro de balanceo en la intersección de las líneas que parten del contacto suelo-neumático.

### 2.2.1.2.2. Suspensión con brazos tirados

La suspensión con brazos tirados consiste en conectar cada rueda al chasis mediante un brazo o dos brazos paralelos que se observan en la figura 2.20. Dichos brazos pueden pivotar sobre su punto de articulación con el chasis, con un eje de pivotamiento perpendicular al eje longitudinal del vehículo, por lo que el plano en el que los brazos se mueven es paralelo al plano de la rueda.

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

Debido a su ubicación, los brazos controlan el cabeceo y también absorben fuerzas producidas durante la frenada y la tracción, debido a esto la estructura debe soportar grandes esfuerzos.

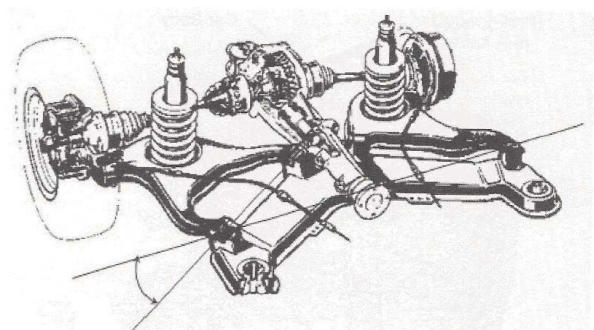
Este sistema no provoca cambio en el ángulo de caída con el recorrido y las ruedas permanecen paralelas al chasis pero si existe cambio de ángulo de caída en el movimiento de balanceo. A veces esta configuración puede utilizarse para el control de ejes rígidos.



*Figura 2.20: Esquema de suspensión de una rueda con dobles brazos tirados*

### 2.2.1.2.3. Suspensión independiente con brazos semi-tirados

La suspensión independiente con brazos semi-tirados es un punto medio entre un esquema de brazos oscilantes y brazos tirados. Se diferencia en que existe articulación con el chasis desplazada hacia dentro del vehículo. En la figura 2.21 pueden apreciarse estas uniones en los elementos sombreados en negro, lo que produce una oscilación del brazo en un plano no paralelo al eje longitudinal del vehículo, es decir pasa a formar un cierto ángulo.



*Figura 2.21: Esquema de suspensión con brazos semi-tirados*

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

### 2.2.1.2.4. Suspensión tipo McPherson

El sistema de suspensión McPherson incorpora una conexión inferior entre la rueda y el chasis mediante un brazo transversal y otro longitudinal, o mediante un brazo triangular. El cometido de esta estructura es la de soportar las fuerzas transversales y longitudinales. La fijación superior se efectúa mediante un puntal telescópico que incluye al amortiguador y el muelle en disposición concéntrica y que ancla la rueda. La unión del pilar con el chasis se encuentra en una posición vertical.

El sistema es barato y simple, además es uno de los sistemas que menos espacio ocupa en sentido lateral y longitudinal al eje longitudinal del vehículo. Esto lo hace indicado para coches con motores transversales o monocasco. La mayoría de espacio que ocupa esta configuración es en dirección vertical tal y como se aprecia en la figura 2.22, lo que limita el diseño en la parte del capó. Esta configuración se utiliza normalmente para el eje delantero

Se trata de una suspensión confortable que no aporta apenas ganancia de caída negativa y requiere la utilización de neumáticos anchos.



*Figura 2.22: Esquema de suspensión tipo McPherson*

### 2.2.1.2.5. Suspensión en dobles triángulos superpuestos

El sistema de suspensión en dobles triángulos superpuestos es utilizado en vehículos de competición por su gran flexibilidad de diseño, que permite adaptarla para

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

cumplir casi cualquier exigencia con eficacia y menor compromiso que cualquier configuración.

Consta en su versión más simple de dos brazos transversales en forma triangular que se disponen de uno en frente al otro articulándose ambos tanto en el chasis como en la rueda.

Existen diferentes configuraciones para este sistema, ya que los brazos pueden o no ser paralelos, pueden o no ser de la misma longitud en vista frontal o superior. Además el resorte y amortiguador pueden ir concéntricos o de forma separada. Se trata de uno de los sistemas de suspensión más versátiles.

La desventaja de este sistema es la complejidad que le otorga el tener tantas variantes, siendo esta complejidad apreciable a nivel mecánico también al requerir mayor número de piezas.

Es el sistema con mejores prestaciones pero requiere bastante espacio en dirección transversal, esto es fácilmente observable en la figura 2.23.



*Figura 2.23: Esquema de suspensión con dobles triángulos superpuestos con el amortiguador y el resorte dispuestos de forma concéntrica*

### 2.2.1.2.6. Suspensión con sistemas multibrazo

El esquema de suspensión multibrazo es similar al sistema de dobles triángulos. En este caso, los dobles triángulos se forman mediante la unión de más brazos articulados. En la figura 2.24 aparecen cuatro brazos, cada brazo es individual y se

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

articula con el siguiente mediante una rotula, de tal manera que se consigue eliminar la carga flectora. Existen multitud de variantes de este tipo con diferentes geometrías y con posibilidad de utilizar hasta cinco brazos [8].



*Figura 2.24: Sistema de suspensión multibrazo*

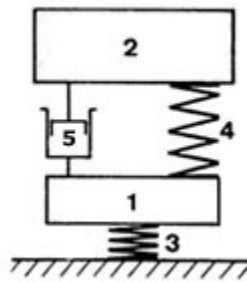
### 2.2.2. Según el sistema de control

Atendiendo al sistema de control de la suspensión existen diversos tipos de suspensión:

- Suspensión pasiva.
- Suspensión activa.
- Suspensión semiactiva.

#### *2.2.2.1. Suspensión pasiva*

Los sistemas de suspensión que están compuestos únicamente por elementos como muelles helicoidales, ballestas, barras estabilizadoras y de torsión, amortiguadores y por supuesto la unión mediante casquillos o *silentblocks*, se encuadrarían como una suspensión pasiva. La figura 2.25 muestra un esquema simplificado de lo que serían los componentes de este tipo de suspensión. A grandes rasgos se podrían describir como sistemas muelle-amortiguador. Poseen la ventaja de un coste menor que los demás, sin embargo poseen un gran inconveniente, el logro de un compromiso entre seguridad y confort.



*Figura 2.25: Esquema de suspensión pasiva de una rueda*

Por un lado el sistema de suspensión debe ser flexible para absorber las vibraciones del asfalto y, de esta forma, aportar mayor confort a los pasajeros. Por otro lado esto tiene un efecto negativo en la estabilidad del vehículo, ya que una suspensión muy flexible generará un alto balanceo y desplazamiento en la masa suspendida dificultando el control del vehículo.

Si lo que se pretende es aumentar el control y la seguridad se necesitaría una suspensión rígida, lo cual disminuiría el confort de los pasajeros, y si lo que se pretende es aumentar el confort sería necesario una suspensión blanda, que empeoraría el control y la seguridad de los ocupantes. Debido a este inconveniente se han desarrollado otros modos de control de los sistemas de suspensión [3], [9].

### *2.2.2.2. Suspensión activa*

La suspensión activa surge como respuesta al inherente conflicto entre la fuerza que ejerce la rueda contra el suelo y el confort del vehículo. Este tipo de suspensión ofrece una solución tecnológicamente muy avanzada para conseguir solucionar este conflicto, consiguiendo además grandes niveles de control, maniobrabilidad y confort en un amplio rango de frecuencias. La principal desventaja de la suspensión activa es su elevado coste, principalmente para el control sobre altas frecuencias, cuya implementación resulta demasiado cara.

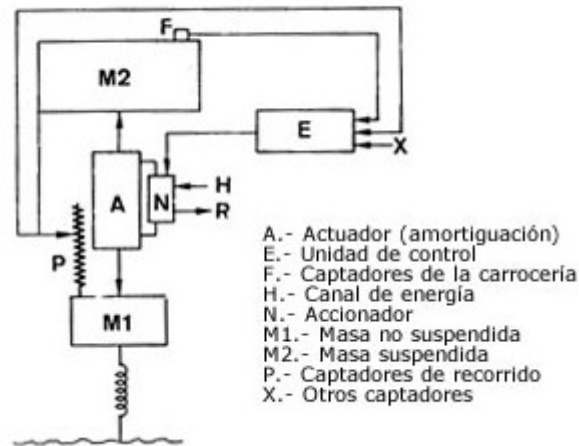
Las suspensiones activas constan de un actuador hidráulico, o neumático, que genera fuerzas para compensar el balanceo y cabeceo del vehículo, mientras que un ordenador electrónico se encarga de monitorizar constantemente (gracias a diversos sensores), el perfil de la carretera y envía señales eléctricas a las suspensiones delantera

---

## Capítulo 2: El sistema de suspensión

---

y trasera. Aquí será donde los componentes hidráulicos, consistentes en bombas, actuadores y electroválvulas, actuarán manteniendo un nivel máximo de estabilidad. La figura 2.26 muestra el esquema de una suspensión activa con diversos actuadores representados.



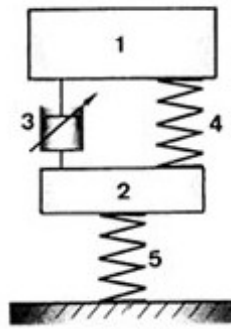
*Figura 2.26: Esquema simplificado de una suspensión activa*

El tiempo de respuesta indica el ancho de banda. Si este abarca un rango de frecuencias de hasta 3 ó 5 Hz el sistema de suspensión se denomina de baja frecuencia, mientras que si el rango abarca frecuencias más elevadas, hasta 10 ó 12 Hz, se denomina de alta frecuencia. La suspensión activa puede controlar ambos rangos. Pero debido al coste que suponen y a la potencia que estos necesitan para funcionar se reduce a la competición y a vehículos de alta gama [3], [9].

### 2.2.2.3. Suspensión semiactiva

La suspensión semiactiva fue propuesta para solucionar los problemas de sobre coste que presentaban las suspensiones activas. Estas suspensiones incorporan elementos pasivos que se encargan de contrarrestar las altas frecuencias, por ejemplo los resortes, y activos que se encargan de las bajas frecuencias. La inclusión de ambos tipos de elementos se hace para lograr optimizar el comportamiento del vehículo ante las irregularidades del terreno. La figura 2.27 posee el esquema de una suspensión semiactiva en el que se observa un amortiguador de coeficiente variable que bien podría ser un amortiguador magneto-reológico.





*Figura 2.27: Esquema de una suspensión semiactiva*

Las suspensiones semiactivas tratan de modificar la rigidez del muelle o bien del amortiguador además pueden elegir qué amortiguadores endurece antes, para controlar el comportamiento del vehículo. Este tipo de suspensiones utilizan muelles tradicionales a diferencia de las suspensiones activas.

Algunos sistemas de suspensión semiactiva incorporan amortiguadores hidráulicos, los cuales disponen de válvulas solenoides que cambian el diámetro de sus pasos permanentes, variando de esta manera el caudal del fluido. El inconveniente que presentan estos tipos de amortiguadores es que tienen un tiempo de respuesta (100-200 milisegundos) superior al tiempo de muestreo del controlador por lo que la fuerza de control generada es diferente a la fuerza de control deseada. Para solucionar este problema, muchos investigadores están centrando su atención en sistemas de suspensión semiactiva basados en fluidos inteligentes cuyos tiempos de respuesta son rápidos como son los fluidos electro-reológicos y los magneto-reológicos (inferior a 25 milisegundos). Dichos fluidos tienen la característica de cambiar sus propiedades viscosas de manera reversible cuando se encuentran bajo la acción de un campo eléctrico o magnético. Los fluidos electro-reológicos requieren ser alimentados con una tensión elevada mientras que los fluidos magneto-reológicos son excitados por un campo magnético por lo que requieren una menor tensión de alimentación. Asimismo, los fluidos magneto-reológicos generan mayores niveles de fuerza que los electro-reológicos y pueden trabajar en un rango mayor de temperaturas. Actualmente, este tipo de amortiguadores están siendo utilizados para mejorar el comportamiento de la suspensión en vehículos automóviles obteniendo muy buenos resultados [3], [9].

---

## Capítulo 3

# Amortiguadores magneto- reológicos

---

## Capítulo 3: Amortiguadores magneto-reológicos

---

Los amortiguadores magneto-reológicos son utilizados en suspensiones semiactivas, el uso de este tipo de suspensiones está cada vez más extendido debido al reducido tiempo de respuesta que poseen y a su mejor adaptación a las condiciones de la vía por la que circula el vehículo

Los amortiguadores magneto-reológicos representan un caso particular de suspensión semiactiva y un avance relativamente reciente. Los primeros prototipos datan de principios de los 90, aunque General Motors presentó este sistema en el año 1999. Se trata de amortiguadores monotubo que en vez de aceite corriente llevan un fluido magneto-reológico, prescindiendo de válvulas electromecánicas. Este fluido está compuesto de un 40% aproximadamente de partículas metálicas flotando en él. Al magnetizarse, según si el campo magnético es fuerte o débil, modifica su viscosidad, consiguiendo variar la dureza del amortiguador. La principal ventaja de este sistema frente a los tradicionales es la rapidez de variación del tipo de amortiguación, y las infinitas posibilidades de regulación que permite.

### **3.1. Fluidos magneto-reológicos**

La reología es la ciencia que estudia la deformación de sustancias bajo el efecto de fuerzas. Esta se limita normalmente a materiales que no obedecen la Ley de viscosidad de Newton y a la Ley de Hooke [10].

En el control de vibraciones es importante la utilización de dispositivos de amortiguamiento y los amortiguadores de fluido viscoso son elementos que aprovechan las propiedades del fluido para proveer una fuerza que contrarreste los efectos de la vibración.

La desventaja con estos amortiguadores es que generalmente las propiedades del fluido son constantes y por tanto su coeficiente de amortiguamiento y el valor de la fuerza generada también son constantes.

Los amortiguadores magneto-reológicos son dispositivos que utilizan fluidos magneto-reológicos que pueden cambiar sus propiedades mediante un estímulo magnético con un cambio en su comportamiento reológico, lo cual puede ser aprovechado para proveer una rápida respuesta en el control de vibraciones.

### Capítulo 3: Amortiguadores magneto-reológicos

---

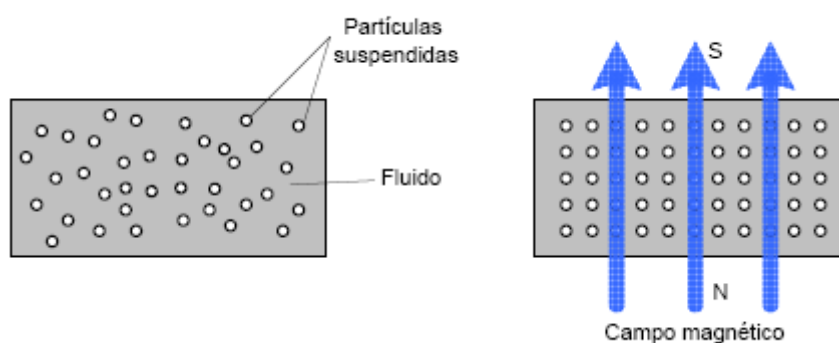
Los fluidos magneto-reológicos son líquidos de consistencia similar a los aceites de motor y están formados por partículas magnetizables finalmente divididas y suspendidas en un líquido portador, tal como un aceite mineral. Cuando un campo magnético externo se aplica al líquido, las partículas en suspensión se convierten en un material semisólido aumentando la viscosidad aparente del fluido, pero si el campo magnético se retira la suspensión se convierte de nuevo en un fluido newtoniano en unos pocos milisegundos. La transición en estos fluidos es altamente reversible [11].

Estos fluidos son llamados ferro-fluidos si sus partículas son del orden de 3 – 15 nm. y fluidos magneto-reológicos si estas son del orden de 0.05 – 8 micrones. Estos últimos poseen innumerables ventajas con respecto al ferro-fluido por lo que actualmente encuentran gran aplicación en el ámbito de los amortiguadores.

En conclusión se puede decir que un fluido magneto-reológico se comporta como un fluido newtoniano de viscosidad controlable.

La respuesta de estos fluidos a la aplicación de un campo magnético consiste en un cambio en su comportamiento reológico. Típicamente, este cambio se manifiesta mediante el desarrollo de un esfuerzo que crece con el campo aplicado. De ahí su habilidad para proveer una simple, silenciosa y rápida respuesta en el control de sistemas mecánicos.

La respuesta de los fluidos magneto-reológicos es resultado de la polarización inducida por un campo magnético externo de las partículas suspendidas, la interacción de los dipolos inducidos resultantes, obliga a dichas partículas a formar estructuras de columnas paralelas al campo aplicado. Estas estructuras tipo cadena restringen el movimiento del fluido dando lugar a un incremento en las características viscosas del amortiguador. En la figura 3.1 se observa un esquema del comportamiento de un fluido magneto-reológico.



*Figura 3.1: Formación de cadenas paralelas al campo magnético*

Un fluido magneto-reológico típico contiene del 20 al 40% de partículas de hierro del volumen total neto, dichas partículas son suspendidas generalmente en aceite mineral, aceite sintético, etc. Los aceites hidrocarburos son preferidos porque son muy buenos lubricantes, durables y estables. Los aditivos evitan la sedimentación de las partículas de hierro y existen en el mercado una gran variedad de fluidos con diferentes viscosidades. Otro factor que interviene en el desarrollo de la fuerza en el fluido es la curva de saturación magnética de las partículas suspendidas. Es recomendable que el nivel de saturación magnética de las partículas sea grande para así obtener un buen fluido magneto-reológico. Las aleaciones de hierro y cobalto tienen una de las mejores niveles de saturación magnética, esto es alrededor de 2.4 teslas, pero, el precio de este tipo de material es muy alto, por lo que no es muy utilizado para aplicaciones prácticas y comerciales; se pueden utilizar entonces partículas de hierro carbono que tienen una saturación magnética de 2.15 teslas. El tamaño de las partículas influye en la suspensión de las mismas en el fluido, esto es, mientras menor sea el tamaño de las partículas la suspensión en el fluido es mucho mejor, favoreciendo la regulación de la dureza de amortiguación; caso contrario mientras mayor sea el tamaño de las partículas se torna difícil la suspensión de las mismas en el fluido y por consiguiente la regulación de la amortiguación [12].

### 3.1.1. Propiedades de los fluidos magneto-reológicos

Se pueden estudiar las propiedades de un fluido magneto-reológico desde dos ámbitos:

---

## Capítulo 3: Amortiguadores magneto-reológicos

---

- Propiedades reológicas.
- Propiedades magnéticas.

### 3.1.1.1. Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas de este tipo de fluidos están determinadas por:

- Concentración y densidad de las partículas.
- Distribución de forma y tamaño de las partículas.
- Las propiedades del fluido portador.
- Aditivos adicionales.
- La intensidad de campo magnético aplicado.
- La temperatura.
- Otros factores.

### 3.1.1.2. Propiedades magnéticas

Es muy importante conocer las propiedades magnéticas de los fluidos magneto-reológicos para tener una visión de los posibles diseños de dispositivos en base a estos fluidos. En varios de los dispositivos, el fluido representa la mayor reluctancia en el circuito magnético, es decir, el fluido es el que mayor resistencia opone a su magnetización.

Los materiales super-paramagnéticos son los ideales para su utilización en este tipo de fluidos magneto-reológicos. Su comportamiento en presencia de un campo magnético es muy conveniente para el funcionamiento esperado de este tipo de amortiguadores. Una vez aplicado un campo magnético a un fluido magneto-reológico, la primera reacción es la alineación de las partículas suspendidas en la dirección del campo magnético aplicado, formando una estructura fibrosa que cambia las características del fluido. Al desaparecer el campo magnético las partículas suspendidas en el fluido no quedan magnetizadas, el fluido magneto-reológico se comporta como un fluido newtoniano normal [12].

Las propiedades típicas de los fluidos magneto-reológicos se muestran en la tabla 3.1.

## Capítulo 3: Amortiguadores magneto-reológicos

---

*Tabla 3.1: Propiedades de un fluido magneto-reológico*

Propiedades	Magnitud
Máximo esfuerzo cortante	50 a 100 kPa
Máximo campo magnético permisible	$\approx 250$ kA/m
Viscosidad aparente	0.1 a 10 Pa·s
Rango de temperatura de operación	- 40 a 150 °C
Estabilidad	Insensible a la mayoría de impurezas
Densidad	3 a 4 g / cm <sup>3</sup>

### **3.2. Aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos**

Las áreas de aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos son muy diversas, entre ellas se puede mencionar las siguientes:

- *Robótica*

El sistema nervioso de los futuros robots puede utilizar fluidos magneto-reológicos para mover las articulaciones y extremidades de forma semejante a los seres vivos.

- *Automotriz*

En el área automotriz se aplica en la atenuación de las vibraciones esto es en el sistema de suspensión, específicamente en los amortiguadores. El confort en los vehículos se asegura con estos amortiguadores magneto-reológicos, porque mediante un control electrónico se puede ajustar en una fracción de segundo la rigidez del amortiguador garantizando así un viaje cómodo y seguro.

- *Construcciones civiles*

Una de las aplicaciones importantes en el mundo de la construcción es la atenuación de los movimientos y vibraciones producidos por los terremotos y las ráfagas de viento.

En Japón ya se ha instalado dispositivos en la construcción de edificios y puentes específicamente el Museo Nacional de Ciencias Emergentes del Japón y el

---

## Capítulo 3: Amortiguadores magneto-reológicos

---

puente del Lago Dong Ting en China, figura 3.2, que está equipado con aislantes de movimiento magneto-reológico para contrarrestar las ráfagas de viento..



Figura 3.2: puente del Lago Dong Ting en China

La prueba del incremento en el crecimiento de la tecnología de dispositivos magneto-reológico es que se han diseñado y construido amortiguadores de tamaño apropiado para aplicaciones en ingeniería civil. En la figura 3.3 se muestra un esquema de un amortiguador de fluido magneto-reológico de gran escala.

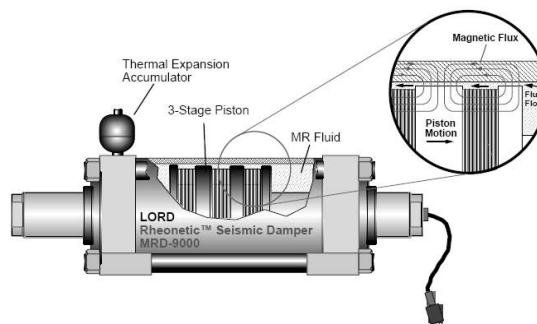


Figura 3.3: Amortiguador sísmico Rheonetic MRD-9000

Otra de las aplicaciones más frecuentes consiste en la protección sísmica de edificios, este hecho se debe a unas características muy determinadas de este tipo de amortiguadores.

Estos amortiguadores amplían el control sobre los choques sísmicos iniciales como los de las réplicas gracias a su alta fuerza de disipación a velocidad baja, características que fundamentalmente actúan frente al choque de las réplicas. No



---

## Capítulo 3: Amortiguadores magneto-reológicos

---

obstante, la reducción del choque inicial, se debe a su rápido tiempo de respuesta, así como a su alto margen dinámico, lo que permite una optimización continua del sistema.

- *Prótesis médicas*

La principal aplicación de este tipo de amortiguadores en la industria médica se trata de la mejora en la movilidad de aquella pierna que fue amputada por encima de la rodilla. Biederman Motech, un fabricante alemán de productos protésicos desarrolló un sistema que aumenta el equilibrio del paso, la estabilidad y la eficiencia de la energía empleada al caminar.

Este sistema, aparte de disponer de un amortiguador, contenía un sistema de sensores que transferían la información a un programa informático, que a su vez transmitía la orden necesaria al amortiguador [3].

### 3.3. Amortiguadores magneto-reológicos

Los amortiguadores magneto-reológicos consisten normalmente en un cilindro hidráulico y una bobina magnética, un diseño muy simple que supone una gran ventaja sobre el resto de tipos de amortiguadores, pero además de esta ventaja poseen más ventajas:

- Rapidez de variación del tipo de amortiguación.
- Diversas posibilidades de regulación.
- Requieren una entrada de energía relativamente baja.
- Producen grandes valores de tensión.
- Son estables operando a una amplia gama de temperaturas.
- Los fluidos magneto-reológicos no son tóxicos y son insensibles a las impurezas.
- Pueden trabajar como si de un amortiguador convencional se tratase.

Son amortiguadores utilizados en suspensiones semiactivas. Al magnetizarse la bobina, según si lo hace mucho o poco, modifica su viscosidad, consiguiendo variar la dureza del amortiguador. A medida que aumenta el campo magnético, el fluido se vuelve fibroso y su estructura llega a ser casi plástica. Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad. Cuando no

### Capítulo 3: Amortiguadores magneto-reológicos

---

está magnetizado, hay una gran diferencia de velocidad entre las partículas que están próximas a las paredes del orificio, y las que fluyen rodeadas de otras partículas del fluido. Gracias a esa diferencia de velocidad, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave. Cuando el fluido está magnetizado, la velocidad de todas las partículas es muy semejante. El flujo es más lento y, por tanto, la dureza del amortiguador aumenta.

El amortiguador se endurece cuando es preciso limitar más los rebotes del muelle para aumentar el contacto con el suelo, bien por razones de estabilidad o por frenada. También actúa para frenar movimientos como balanceo o cabeceo, aunque la amplitud de esos movimientos depende de los muelles y las barras estabilizadoras, no de los amortiguadores.

La desventaja con los amortiguadores tradicionales, es que generalmente las propiedades del fluido son constantes y en consecuencia el coeficiente amortiguamiento y el valor de la fuerza generada [12].

Las múltiples ventajas que ofrecen han suscitado su utilización en muy diversos ámbitos como los nombrados en el apartado 3.2.

---

## Capítulo 4

# Modelos de amortiguadores magneto-reológicos

---

## Capítulo 4: Modelos de amortiguadores magneto-reológicos

---

El control efectivo de un amortiguador magneto-reológico depende principalmente en la comprensión de su comportamiento no lineal de histéresis. Para aprovechar al máximo las características únicas de un amortiguador magneto-reológico es necesario contar con algoritmos de control que caractericen adecuadamente el comportamiento no lineal de estos elementos. Los modelos que actualmente existen se encuentran divididos en dos tipos [11]:

- No paramétricos: modelan el comportamiento del amortiguador de tal forma que los parámetros del modelo no poseen significado físico. Son modelos que se basan en la utilización de redes neuronales o polinomios de Chebyshev. Son modelos de gran complejidad y requieren multitud de datos experimentales [11].
- Paramétricos: los parámetros poseen sentido físico, además constan de parámetros físicos conocidos como la viscosidad lineal, la fricción, expresiones propias de resortes y amortiguadores. Uno de los primeros modelos paramétricos fue el modelo de Bingham al que posteriormente sustituyó el modelo Bouc-Wen como modelo más utilizado [11].

### **4.1. Modelos paramétricos**

Dentro de los modelos paramétricos cabe mencionar los siguientes:

- Modelo Bouc-Wen.
- Modelo Bouc-Wen modificado.
- Modelo Dahl.
- Modelo de fricción de LuGre modificado.

#### **4.1.1. Modelo Bouc-Wen y Bouc-Wen modificado**

A lo largo de los años la materia de los amortiguadores magneto-reológicos ha ido evolucionando y se han obtenido múltiples modelos y expresiones que explican el comportamiento de un amortiguador. De todos ellos el modelo que más fielmente ha conseguido reproducir el comportamiento de este elemento mecánico es el Bouc-Wen, dicho modelo sugiere el comportamiento del amortiguador a partir de un conjunto de constantes que simulan el efecto producido por las irregularidades en las paredes tanto del amortiguador como el émbolo.

## Capítulo 4: Modelos de amortiguadores magneto-reológicos

El modelo además utiliza los parámetros en función del voltaje al que es sometido el fluido.

El esquema que podría asimilarse a este modelo es el mostrado en la figura 4.1. Este modelo consta de un amortiguador en serie con un conjunto resorte-amortiguador y a su vez en paralelo con un resorte.

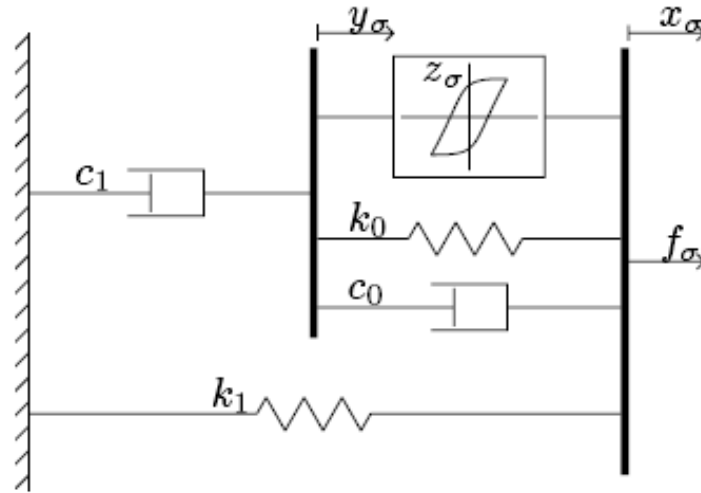


Figura 4.1: Esquema del modelo Bouc-Wen

El modelo Bouc-Wen ha sido ampliamente utilizado ya que es extremadamente versátil y puede exhibir una amplia variedad de comportamiento histerético.

Las expresiones que simulan el comportamiento de este modelo son las siguientes:

$$f = c_1 \cdot \dot{y} + k_1 \cdot (x - x_0) \quad (4.1)$$

donde  $f$  es la fuerza de amortiguación,  $c_1$  es el coeficiente de amortiguación del amortiguador 1,  $k_1$  es la rigidez del acumulador,  $x$  es el desplazamiento relativo entre los dos extremos del conjunto,  $x_0$  es el desplazamiento inicial del conjunto e  $y$  es la derivada del desplazamiento relativo entre los extremos del muelle 0 cuya expresión es la siguiente:

$$\dot{y} = \frac{1}{c_1 + c_0} \cdot [\alpha \cdot z + c_0 \cdot \dot{x} + k_0 \cdot (x - y)] \quad (4.2)$$

## Capítulo 4: Modelos de amortiguadores magneto-reológicos

---

donde  $\alpha$ ,  $c_1$  y  $c_0$  son coeficientes de amortiguación que dependen del voltaje suministrado al fluido. Además,  $z$  es desplazamiento sufrido por las imperfecciones de las paredes cuya expresión es la siguiente:

$$\dot{z} = -\gamma \cdot |\dot{x} - \dot{y}| \cdot z \cdot |z|^{n-1} - \beta \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \cdot |z|^n + A \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \quad (4.3)$$

donde  $A$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $n$  son parámetros que se determinan de manera experimental.

Los parámetros de amortiguación  $c_1$ ,  $c_0$  y  $\alpha$  varían linealmente con la aplicación del voltaje de entrada:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b \cdot u \quad (4.4)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} \cdot u \quad (4.5)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} \cdot u \quad (4.6)$$

siendo el parámetro  $u$  una variable dependiente del voltaje:

$$\dot{u} = -\eta \cdot (u - v) \quad (4.7)$$

En este caso, el voltaje que se ha utilizado en las simulaciones ha sido un voltaje lineal dependiente del tiempo:

$$v = 1.25 + t \quad (4.8)$$

Por último el parámetro que falta es el desplazamiento  $x$ , la expresión que se ha utilizado para las modelizaciones tanto en *Modelica* como en *Simulink* ha sido la de una onda armónica:

$$x = Amp \cdot Sen(\omega \cdot t + \varphi) \quad (4.9)$$

donde  $Amp$  es la amplitud de la senoide,  $\varphi$  es el desfase inicial de la onda y  $\omega$  es la frecuencia que posee la siguiente expresión:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4.10)$$

## Capítulo 4: Modelos de amortiguadores magneto-reológicos

---

Este modelo además predice bien el comportamiento del amortiguador en el momento en el que la aceleración y la velocidad poseen signos opuestos y la magnitud de la velocidad es pequeña. Esto es una ventaja ya que con otros modelos es difícil encontrar resultados válidos para esta región [11], [13], [14].

### 4.1.2. Modelo Dahl modificado

El modelo de Dahl modificado sugiere una versión más simple que el modelo del apartado 4.1.1. El modelo de histéresis de Dahl fue adoptado para simular la fuerza de Coulomb para evitar la estimación de demasiados parámetros.

El modelo de Dahl supone una mejora en cuanto a que ofrece mayor simplicidad ya que se pasa de catorce variables en el modelo Bouc-Wen a ocho variables. La figura 4.2 muestra un esquema del modelo Dahl modificado.

Por otra parte, el modelo de Dahl al igual que el modelo Bouc-Wen simula con bastante eficacia la zona de baja velocidad. La fuerza generada por el amortiguador en este modelo es de la siguiente forma:

$$f = k_0 \cdot x + c_0 \cdot \dot{x} + F_d \cdot z - f_0 \quad (4.11)$$

donde  $k_0$  representa la rigidez del muelle lineal,  $c_0$  es el coeficiente de amortiguación,  $F_d$  es la fuerza de coulomb modulada por la aplicación del campo magnético,  $x$  el desplazamiento del amortiguador y  $f_0$  la fuerza del amortiguador causada por las fluctuaciones de voltaje y los errores en las mediciones.

El parámetro  $z$  es el de histéresis adimensional cuya expresión es la siguiente:

$$z = \sigma \cdot \dot{x}(1 - \dot{z} \cdot \text{sgn}(\ddot{x})) \quad (4.12)$$

donde  $\sigma$  es un parámetro que determina la forma del bucle de histéresis se obtiene de manera experimental,  $\dot{x}$  y  $\ddot{x}$  son la derivada primera y segunda del desplazamiento relativo entre los extremos del amortiguador.

Para calibrar el modelo de Dahl aplicando un campo magnético fluctuante es necesario obtener la relación entre los parámetros del modelo, estas relaciones se escriben de la siguiente forma:

$$c_0 = c_{0s} + c_{0d} \cdot u \quad (4.13)$$

$$F_d = F_{ds} + F_{dd} \cdot u \quad (4.14)$$

donde  $c_{0s}$  y  $F_{ds}$  son el coeficiente de amortiguamiento y la fuerza de Coulomb, respectivamente,  $u$  es la variable intrínseca para determinar la dependencia de los parámetros a la tensión aplicada  $v$  en cada instante. Dicha relación es la propuesta por Spencer et al.:

$$\dot{u} = -\eta \cdot (u - v) \quad (4.15)$$

donde  $\eta$  refleja el tiempo de respuesta del amortiguador, mayor  $\eta$  supone menor tiempo de respuesta. En conclusión el modelo consta de un total de ocho parámetros determinados de manera experimental ( $C_{0s}$ ,  $C_{0d}$ ,  $F_{ds}$ ,  $F_{dd}$ ,  $K_0$ ,  $\sigma$ ,  $f_0$  y  $\eta$ ) [5], [15], [16].

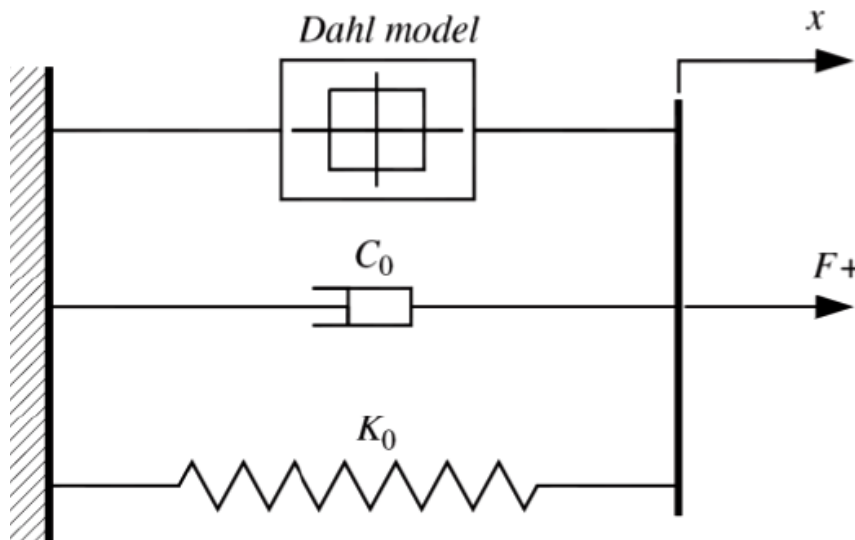


Figura 4.2: Esquema de un modelo Dahl modificado

### 4.1.3. Modelo de fricción de LuGre

El modelo de LuGre se utiliza para representar la dinámica de un amortiguador, este modelo es una extensión del propuesto por Dahl. Se ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones de fricción debido a su simplicidad matemática y su elevada precisión [17], [18].



## Capítulo 4: Modelos de amortiguadores magneto-reológicos

---

El modelo se expresa como sigue:

$$F = f_0 + \beta \cdot z + \gamma \cdot \dot{x} + \delta \cdot x + \varepsilon \cdot \dot{z} \quad (4.16)$$

donde los valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\varepsilon$  representan parámetros de rigidez. La variable  $z$  representa la deformación sufrida por el fluido magneto-reológico posee la siguiente expresión:

$$\dot{z} = \dot{x} - \alpha \cdot |\dot{x}| \cdot z \quad (4.17)$$

### 4.2. Modelos algebraicos

Los modelos algebraicos son relativamente modernos, el modelo más sencillo fue el propuesto por Kwok et al [19] al que más tarde siguió el modelo propuesto por Guo y Hu [20] con el que se descubrió que estos modelos podían capturar con exactitud el comportamiento lineal de los amortiguadores magneto-reológicos.

De los modelos algebraicos se mencionan tres:

- Modelo Kwok.
- Modelo algebraico.
- Modelo algebraico modificado.

#### 4.2.1. Modelo de Kwok

Kwok et al [19] propuso un modelo, cuyo esquema aparece en la figura 4.3, que hace uso de una función tangente hiperbólica para representar la histéresis y funciones lineales para representar la viscosidad y la rigidez del amortiguador:

$$F = c \cdot \dot{x} + k \cdot x + \alpha \cdot z + f_0 \quad (4.18)$$

$$z = \tanh [\beta \cdot \dot{x} + \delta \cdot \text{sgn}(x)] \quad (4.19)$$

donde  $c$  y  $k$  son los coeficientes de viscosidad y rigidez,  $\alpha$  el factor de escala de la histéresis, la variable  $z$  representa el comportamiento histerético dado por la tangente hiperbólica y la  $f_0$  es el factor de compensación de errores y fluctuaciones inherentes.

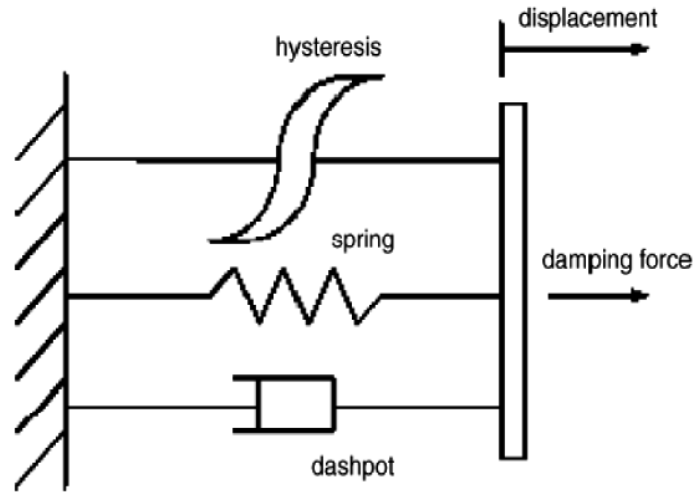


Figura 4.3: Esquema de un modelo Kwok

### 4.2.2. Modelo Algebraico

El modelo algebraico es un modelo sencillo propuesto por Guo y Hu [20], para modelar la histéresis, su comportamiento viene determinado por una única expresión:

$$F = f_0 + c_b \cdot \dot{x} + \frac{2}{\pi} \cdot f_y \cdot \arctan\{k \cdot [\dot{x} - \dot{x}_0 \cdot \text{sgn}(\dot{x})]\} \quad (4.20)$$

donde  $F$  representa la fuerza de amortiguamiento del amortiguador magneto-reológico,  $f_0$  corresponde a la precarga del acumulador de gas,  $c_b$  es el coeficiente de amortiguamiento viscoso,  $f_y$  la fuerza de rendimiento,  $k$  es el coeficiente de forma mientras que la velocidad de de histéresis y la aceleración vienen dadas por  $\dot{x}$  y  $\ddot{x}$  [13].

### 4.2.3. Modelo algebraico modificado

El modelo algebraico mostró buenos resultados cuando el voltaje aplicado tomaba valores reducidos.

Esto es debido a la fuerza de inercia del líquido que se convierte en una magnitud significativa cuando el voltaje no es lo suficientemente grande. Por tanto, el modelo se modifica añadiendo un término de fuerza de inercia a fin de mejorar el acuerdo entre la simulación y los datos experimentales:

$$F = f_0 + c_b \cdot \dot{x} + \frac{2}{\pi} \cdot f_y \cdot \arctan\{k \cdot [\dot{x} - \dot{x}_0 \cdot \operatorname{sgn}(\ddot{x})]\} + m \cdot \ddot{x} \quad (4.21)$$

donde  $m$  representa una masa virtual que se determina mediante datos experimentales [13], [20].

---

## Capítulo 5

# El modelado de sistemas dinámicos

---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

Un sistema es un objeto o colección de objetos cuyas propiedades se desean estudiar. El deseo de estudiar ciertas propiedades seleccionadas de los objetos es central en esta definición. El aspecto de “estudio” es importante, a pesar del hecho de que es subjetivo. La selección y definición de lo que constituye un sistema es algo arbitrario y debe estar guiado por el uso que se va a hacer del sistema.

Las dos grandes razones que pueden existir para querer analizar un sistema son:

- Estudiar un sistema para comprenderlo, con la finalidad de construirlo. Este es el punto de vista de la ingeniería.
- Satisfacer la curiosidad humana, por ejemplo, para comprender más acerca de la naturaleza.

Los sistemas pueden ser de tipo natural, por ejemplo el universo, o de tipo artificial, cualquier elemento mecánico, por ejemplo un amortiguador, pero también puede existir un sistema mixto que combina propiedades de ambos sistemas.

Para estudiar un sistema hace falta una definición de los parámetros que se quieren obtener por respuesta o que se quieren conocer de él. Cualquier sistema debe tener dos características, debe ser observable y debe ser controlable, aunque existen sistemas que no cumplen ninguna de estas dos características y por tanto no se puede extraer información de ellos.

Las entradas de un sistema son variables del entorno que influyen en el comportamiento del sistema y pueden ser o no ser controlables.

Las salidas de un sistema son variables determinadas por el mismo que pueden influir sobre el entorno que le rodea.

La mejor manera de estudiar el comportamiento de un sistema es realizar un experimento, para poder realizar un experimento el sistema debe cumplir las características anteriormente citadas (ser observable y controlable). En un experimento se aplican un conjunto de condiciones externas a las entradas del sistema y se observa la respuesta de las salidas a dichas perturbaciones.

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

Una de las desventajas es que en determinados sistemas las entradas son inaccesibles, además el experimento puede ser demasiado costoso, puede ser demasiado peligroso o puede simplemente no existir.

Las desventajas de la experimentación llevan al concepto de modelo, si se realiza un modelo lo suficientemente realista se pueden encontrar las respuestas que no se pueden obtener en la experimentación [1].

### **5.1. Modelado y simulación**

Al aplicar las leyes de la física a un sistema específico, es posible desarrollar un modelo matemático que describa al sistema. Tal sistema puede contener parámetros desconocidos los cuales deben evaluarse mediante pruebas reales. Sin embargo, solo algunas veces las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de un sistema no están completamente definidas y la formulación de un modelo matemático puede resultar imposible. De ser así, se puede utilizar un modelado experimental. En este procedimiento de modelado experimental se somete al sistema a un conjunto de entradas conocidas y se miden sus salidas. A partir de las relaciones de entrada y salida se deriva entonces el modelo matemático.

La rapidez con la que un ordenador puede realizar operaciones aritméticas permite incluir cientos de ecuaciones para describir un sistema y para construir un modelo exacto, pero muy complicado. Si no se requiere de una gran exactitud, es preferible desarrollar un modelo razonablemente simplificado.

Para determinar un modelo razonablemente simplificado, se necesita decidir cuáles de las variables y relaciones físicas pueden despreciarse y cuáles son cruciales para la exactitud del modelo. Con objeto de obtener un modelo en la forma de ecuaciones diferenciales lineales, se deben despreciar los parámetros distribuidos y las no linealidades que pueden estar presentes en el sistema físico. Si los efectos que estas propiedades ignoradas tienen en la salida son pequeños, entonces los resultados del análisis del modelo matemático y los resultados obtenidos de la simulación serán satisfactorios.

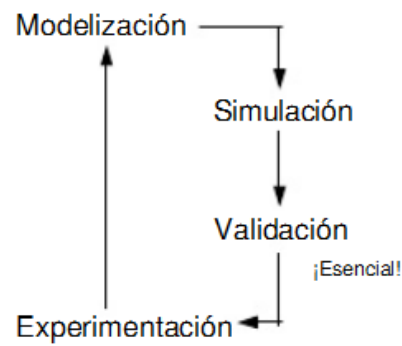
---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

En la resolución de problemas nuevos, es conveniente crear previamente modelos simplificados para obtener una idea general acerca de la solución que se obtendrá, para posteriormente construir el modelo matemático detallado.

Una simulación es un experimento efectuado sobre un modelo. Un modelo matemático puede ser ejecutado en un ordenador, en ese caso la simulación puede darse mediante métodos numéricos o métodos analíticos. De ésta forma, la simulación es una forma simple y segura de efectuar un experimento. La simulación no suele ser utilizada de manera aislada, sino que se combina con técnicas analíticas para conseguir mejores resultados [1], [22]. La figura 5.1 muestra el esquema de un ciclo de simulación.



*Figura 5.1: Esquema de un ciclo de simulación*

### 5.1.1. Procedimiento para la elaboración de modelos matemáticos

El procedimiento de elaboración de modelos matemáticos en la práctica consta de varias partes:

- Elaborar el diagrama esquemático del sistema y definir las variables que influyen en él.
- Escribir las ecuaciones que rigen el funcionamiento de cada componente que integra el sistema, utilizando las leyes físicas y de acuerdo con el diagrama del mismo.
- Verificar la validez del modelo, para ello se compara la predicción previamente hecha de los resultados con los resultados obtenidos por el modelo. Si los resultados experimentales se alejan de la predicción en magnitud considerable, debe modificarse el modelo. Entonces se obtiene un nuevo modelo y las

---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

predicciones se comparan con los nuevos resultados experimentales. El proceso se repite hasta que existe una concordancia satisfactoria entre los resultados [22].

### 5.1.2. *Paradigmas de modelado*

El desarrollo de metodologías para el modelado dinámico ha ido asociado al desarrollo de los métodos matemáticos y de las herramientas software que posibilitan su aplicación. A continuación, se muestran varios de los paradigmas que se han utilizado a lo largo de la evolución de los mismos, empezando por el modelado modular hasta llegar al modelado orientado a objetos y el acausal.

#### 5.1.2.1. *Modelado modular*

El análisis por reducción de un sistema consiste en el estudio del mismo mediante su descomposición en partes, analizando el comportamiento individual de las partes y la interacción entre ellas. La técnica se basa en los siguientes dos supuestos. El primero es que las partes individuales son más sencillas de entender que el conjunto. El segundo es que entendiendo el comportamiento de cada parte y cómo interaccionan entre sí las partes, se puede inferir, y por tanto comprender, el comportamiento del conjunto.

La metodología del modelado modular está fundamentada en la técnica del análisis por reducción. De acuerdo con esta metodología, el modelado modular de un sistema consta básicamente de las siguientes tres fases:

- Estudio de la estructura del sistema y descomposición en partes.
- Modelado de la interacción entre las partes.
- Modelado del comportamiento interno de cada parte independientemente de las demás.

A fin de facilitar la aplicación de esta metodología, es preciso que el lenguaje de modelado posibilite la modularidad, la componibilidad y la abstracción. Se llama modularidad a la capacidad de describir cada una de las partes del modelo de forma independiente. La componibilidad es la capacidad de describir y realizar el ensamblaje entre las partes del modelo. Finalmente, se llama abstracción a la posibilidad de usar cada parte del modelo sin conocer sus detalles internos. La abstracción es un modo de



## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

afrontar el problema de la complejidad de los sistemas de grandes proporciones, al posibilitar que varios especialistas puedan trabajar independientemente en diferentes partes del modelo del sistema sin tener que conocer todos los detalles del resto del mismo.

Una forma de facilitar la abstracción consiste en diferenciar en cada parte del modelo, entre la interfaz y la descripción interna. La interfaz es la parte que describe la interacción del modelo con su entorno, a la vez que aísla éste de la descripción interna del modelo, de modo que pueden ser considerados separadamente. La descripción interna del modelo contiene la información acerca de la estructura y el comportamiento.

La abstracción y la modularidad están íntimamente relacionadas con el encapsulado de la información, consistente en que sólo las variables pertenecientes a la interfaz sean accesibles desde el exterior del módulo por otros módulos (si bien todas las variables pueden ser observadas en la simulación del modelo). La ocultación de la información como criterio de diseño de los sistemas modulares facilita las modificaciones, las pruebas y el mantenimiento de los modelos.

### 5.1.2.2. *Modelado jerárquico*

A fin de facilitar su diseño y comprensión, el modelo puede, además de modularmente, realizarse de forma jerárquica, es decir, progresando de menor a mayor nivel de detalle en su descripción: el modelo se divide en submodelos, que a su vez pueden dividirse en sub-submodelos y así sucesivamente. Esta descripción del modelo en diferentes niveles de detalle facilita además su mantenimiento y reutilización.

La descripción modular y jerárquica del modelo conduce a dos tipos de submodelos: los primitivos y los compuestos. Los submodelos primitivos o atómicos no están compuestos por otros submodelos y describen mediante ecuaciones el comportamiento de los componentes del proceso. Los submodelos compuestos o moleculares están constituidos por otros submodelos, primitivos o compuestos, y las conexiones entre ellos.

Esta organización de la información en distintos niveles de profundidad, ocultando en cada nivel la información correspondiente a los niveles de detalle superior,

---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

facilita su comprensión. Esto no supone una limitación si desde cualquier nivel de descripción del modelo puede accederse o bien al nivel superior de detalle de cualquiera de sus submodelos o bien al nivel inferior de detalle. A esta propiedad se la llama zoom de la información.

### 5.1.2.3. *Modelado gráfico basado en bloques*

El paradigma de modelado basado en bloques soporta el modelado modular y jerárquico, pero con una particularidad: se realiza una descripción causal del modelo. Es decir, la descripción del modelo debe contener explícitamente información acerca de qué variable debe calcularse de cada ecuación. El modelo está compuesto por bloques computacionales en los que explícitamente se indica qué variables son las entradas computacionales y qué variables son salidas computacionales. Asimismo, el modelo debe formularse de modo que sus ecuaciones puedan ser resueltas una tras otra en secuencia. Es decir, de modo que no existan lazos algebraicos (también denominados sistemas de ecuaciones simultáneas). Para ello, pueden emplearse técnicas consistentes en introducir dinámicas ficticias (variables de estado ficticias) cuya finalidad es romper los lazos algebraicos.

Dos ejemplos de entornos de simulación que soportan el paradigma del modelado gráfico basado en bloques son ACSL *Graphics Modeller* y Simulink.

Esta metodología de modelado requiere de un esfuerzo considerable por parte del desarrollador del modelo, ya que debe analizar la estructura computacional del modelo, ordenar las ecuaciones y manipularlas simbólicamente.

Asimismo, la descripción causal del modelo supone una fuerte restricción respecto al contexto en que pueden utilizarse los modelos: una modificación en una de las partes del sistema, en la forma de conectar las partes o en las condiciones de contorno del sistema pueden obligar a rehacer la descripción de todo el modelo.

Otra consecuencia de la necesidad de realizar una descripción causal es que la estructura modular de este tipo de modelos no refleja la del sistema que representa, sino la estructura computacional del modelo.

---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

### 5.1.2.4. *Modelado acausal*

El modo de resolver este problema es no incluir información acerca de causalidad computacional en la descripción matemática del modelo. Este es el enfoque empleado por los lenguajes de modelado acausales. De esta manera, se libera al desarrollador del modelo de la tediosa tarea de establecer por sí mismo la causalidad computacional y además los modelos descritos acausalmente pueden ser reutilizados en diferentes contextos computacionales.

Al contrario de lo que sucede en los lenguajes de simulación con causalidad computacional explícita, en los cuales escribir una ecuación del tipo “variable = expresión” implica que de esa ecuación debe evaluarse la variable situada al lado izquierdo de la igualdad, en los lenguajes de modelado acausales el modo de escribir una ecuación (en la parte continua del modelo) no informa acerca de la variable que debe calcularse de ella. Los modelos son declarativos, al definir relaciones más que constituir procedimientos para el cálculo de los datos.

El primer lenguaje de modelado acausal fue denominado Dymola, se comercializó a comienzos de la década de 1990. Desde esa fecha han aparecido otros lenguajes de modelado acausales, que además estaban orientados a objetos, entre los cuales cabe citar ABACUSS II, ASCEND, Camas, EcosimPro, gPROMS, MODE.LA, Modelica, NMF, ObjectMath, Omola y Smile. Algunos de ellos se encuentran actualmente en desuso.

Puesto que en estos lenguajes la descripción del modelo no incluye información acerca de qué variable debe calcularse de cada ecuación, los entornos de modelado (herramientas software) que los soportan deben disponer de algoritmos para analizar la estructura computacional del modelo completo, decidir qué variable debe calcularse de cada ecuación y realizar las manipulaciones simbólicas pertinentes. En general, las manipulaciones que la herramienta de modelado realiza sobre el modelo tienen por objeto transformar la descripción externa del mismo, generada por el usuario empleando el correspondiente lenguaje de modelado, a una formulación (descripción interna) adecuada para su resolución numérica.

---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

La descripción interna del modelo contiene la descripción plana del conjunto de ecuaciones del modelo, simplificadas, ordenadas y manipuladas simbólicamente. Además, la descripción interna contiene información relativa a la resolución numérica (por ejemplo, cuáles son las variables de estado, cómo deben cortarse los lazos algebraicos no lineales, etc.) y a los métodos numéricos a emplear. De la descripción interna del modelo, la herramienta de modelado genera un fichero fuente, escrito en algún lenguaje de programación (generalmente C o Fortran), de cuya compilación y linkado con las librerías adecuadas se obtiene el fichero ejecutable que lleva a cabo la simulación.

La transformación de la descripción externa del modelo a su descripción interna conceptualmente implica la realización consecutiva de tres operaciones, que pueden denominarse elaboración, análisis y optimización:

- La elaboración consiste en la traducción del modelo, de su descripción orientada a objetos, acorde al correspondiente lenguaje de modelado, a una formulación plana del conjunto completo de sus ecuaciones, con toda la estructura de herencia, jerarquía y modularidad eliminada.
- Del análisis estructural de esta formulación plana resulta la simplificación (eliminación de variables redundantes y ecuaciones triviales), la asignación de la causalidad computacional, la ordenación de las ecuaciones, manipulación simbólica de las ecuaciones en las que la incógnita interviene linealmente y reducción del índice del sistema a cero o uno.
- La optimización del modelo tiene por objeto hacer más eficiente su resolución numérica.

El entorno de modelado debe tener al menos algún resolutor numérico de sistemas DAE, por ejemplo, DASSL.

### 5.1.2.5. *Modelado orientado a objetos*

El diseño orientado a objetos es un método de la ingeniería del software, consistente en analizar el sistema como un conjunto de objetos interactuantes. El diseño orientado a objetos también se aplica al modelado de sistemas dinámicos: un submodelo

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

encapsula datos, estructura y comportamiento del mismo modo que en la programación orientada a objetos se encapsulan los datos y los procedimientos.

Este método de diseño se basa, entre otros, en los tres elementos conceptuales expuestos anteriormente: la abstracción, la ocultación de la información y la modularidad. Al igual que en el modelado modular y jerárquico, al realizar el diseño se define la estructura del sistema a modelar y la interacción entre sus partes antes de considerar la representación del comportamiento de sus componentes básicos.

Conceptos importantes en el modelado orientado a objetos son los de clase e instanciación de una clase. Una clase es una descripción de un grupo de objetos con propiedades similares. Los modelos se representan como clases más que como instancias, ya que un modelo normalmente es una descripción de un tipo de sistema más que una representación de un sistema en particular. La simulación se realiza sobre una instanciación del modelo.

Los dos modos fundamentales de reutilización de las clases son la composición y la especialización. La composición es la capacidad de definir nuevos modelos formados por submodelos, anteriormente definidos, conectados entre sí. La especialización es la capacidad de definir nuevos modelos especializando otros ya existentes.

La parametrización es un concepto clave en la reutilización. Los parámetros de un modelo son todas aquellas propiedades que pueden cambiarse para adaptar el modelo a sus diferentes aplicaciones. Un parámetro puede ser, en sentido amplio, desde una simple variable hasta una estructura completa de submodelos.

La herencia es un mecanismo de compartición de información entre clases mediante especialización. Una clase A puede definirse como una subclase de la clase B, diciéndose entonces que B es la superclase de A. Cuando una clase sólo puede tener una única superclase se dice que hay herencia simple y en caso contrario que hay herencia múltiple. La subclase hereda todos los atributos definidos en su superclase, con lo que puede considerarse como un refinamiento o especialización del concepto general definido en su superclase, al cual se añaden nuevos componentes o ecuaciones propios de la subclase. Si los valores de atributos locales de una clase están en contradicción con

---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

los heredados de su superclase, prevalecen en la clase los valores locales. Esta propiedad es una forma de parametrización, ya que supone la modificación de algunas de las propiedades para adaptar el modelo a sus diferentes aplicaciones.

El polimorfismo es un concepto estrechamente relacionado con la reutilización de los modelos. Modelos polimórficos son aquellos que tienen interfaces con estructuras equivalentes y que además tienen los mismos grados de libertad (diferencia entre el número de variables y el número de ecuaciones del modelo). El polimorfismo es una primera condición para que varios modelos puedan ser usados en el mismo contexto e intercambiados sin necesidad de alterar el resto del sistema. Frecuentemente los modelos polimórficos poseen una misma superclase en común, que es aquella en la cual se define la interfaz.

En la actualidad los lenguajes de modelado acausales soportan la metodología de la orientación a objetos. La metodología del modelado orientado a objetos facilita el diseño, la programación, la reutilización y el mantenimiento de los modelos. Por ello, reduce el coste (entendido en el sentido amplio del término) asociado a cada una de las fases del ciclo de vida de los modelos, aumentando la productividad de los desarrolladores de los modelos y la calidad del código obtenido. En este sentido, la metodología favorece que varios programadores puedan trabajar independientemente sobre diferentes partes del modelo, así como la reutilización del código [23], [24].

### 5.2. Introducción a Modelica

*Modelica* es principalmente un lenguaje de modelado que permite especificar o crear modelos matemáticos de sistemas naturales o artificiales. *Modelica* es un lenguaje de programación orientado a objetos que controla múltiples ecuaciones matemáticas y las resuelve de manera acausal, es decir, como se explica en el apartado 5.1.2.4 el programa decide que incógnitas son las que necesita y realiza las transformaciones necesarias en las ecuaciones para llegar a una solución [25].

Las características más importantes del lenguaje Modelica son:

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

- Modelica es un lenguaje que se basa principalmente en ecuaciones en lugar de asignaciones. Esto permite modelar de forma más sencilla ya que su manera de resolver las ecuaciones no tiene un sentido definido.
- Modelica posee una capacidad de modelado multidominio, lo que significa que los objetos del modelo pueden provenir de diferentes dominios.
- Modelica es un potente software de modelado de componentes que permite la creación y la conexión de componentes, cuyo formato es ideal para una descripción estructurada de sistemas complejos.

Tradicionalmente, un compilador lleva a cabo la tarea de traducir un código ejecutable que a continuación se lleva a cabo durante la simulación del modelo. Así el paso de traducción es seguido de una etapa de ejecución, dicha simulación a menudo involucra cálculos numéricos a gran escala.

El compilador con el que trabaja Modelica, gracias a la existencia de paquetes y su diseño modular hace que tenga un alto grado de exactitud en las implementaciones generadas, además las propiedades del lenguaje en lugar de una descripción detallada de funcionamiento de la traducción proceso, hace que sea mucho más fácil de verificar la consistencia lógica de construcciones del lenguaje y para detectar omisiones y errores. Esto es virtualmente imposible para una aplicación tradicional, que a menudo requiere mucho tiempo de depuración y las pruebas para obtener una compilación de calidad aceptable.

La especificación Modelica y el lenguaje de modelado se desarrolló originalmente como un lenguaje de programación orientado a objetos a base de ecuaciones para el modelado matemático de sistemas complejos y en particular sistemas físicos.

Las clases o componentes son el elemento fundamental en Modelica. Constituyen la herramienta básica para representar el comportamiento, desde sistemas simples e indivisibles, hasta sistemas muy complejos formados por otros subsistemas. En Modelica las clases pueden ser de múltiples tipos. A continuación, se explican varios de los tipos:

---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

- “Model”: La clase modelo es la que con más frecuencia se usa para propósitos de modelado. Su única restricción es que el modelo no puede usarse en conexiones.
- “Package”: Un paquete es primariamente usado para organizar código Modelica y puede únicamente contener declaraciones de otras clases y constantes.
- “Function”: El concepto de función en Modelica corresponde a funciones matemáticas sin efectos externos y pueden ser recursivas.
- “Connector”: La clase conector es típicamente usada como una plantilla para conectores. Un conector es un punto de conexión usado para comunicar datos entre objetos.
- “Record”: Esta clase es utilizada para especificar datos sin comportamiento.
- “Block”: Un bloque es una clase para la que la causalidad (saber si la dirección del flujo de datos es entrada o salida) de cada una de estas variables es conocida.

Las librerías tienen como objetivo el de almacenar modelos o clases ya desarrolladas para su posterior utilización.

Las librerías de Modelica a diferencia de las de otros lenguajes tienen la particularidad de la inclusión de propiedades de representación gráfica de los componentes dentro de ellas mismas y en las librerías en las que se almacenan. Modelica permite a un componente asociar un icono gráfico dentro de la misma definición de éste mediante directivas “annotation”. De esta forma, un usuario podría programar la información gráfica de su componente además de modelar su comportamiento. Un diseñador de librerías podría incluso programar directamente en Modelica las primitivas gráficas que representan a la clase en un diagrama gráfico. Normalmente, la descripción gráfica del componente la realiza la misma herramienta de simulación mediante capturadores de esquemas [26].

### 5.2.1. Estructura de un modelo en Modelica

En el presente Proyecto Fin de Carrera se quiere crear a partir del modelo “damper”, perteneciente a un amortiguador lineal, tres nuevos modelos de amortiguadores cuyo comportamiento esté regido por las expresiones de los tres modelos de amortiguadores magneto-reológicos seleccionados.



---

## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

A continuación, se muestra como ejemplo el modelo de amortiguador simple de *Modelica* el modelo de amortiguador (model damper), del que se irá explicando las partes de que consta:

```
1) Model Damper "Linear 1D translational damper"
2) extends Translational.Interfaces.PartialCompliantWithRelativeStates;
3) parameter SI.TranslationalDampingConstant d(final min=0, start = 0) "damping
   constant";
4) equation
5) f = d*v_rel;
6) annotation ()
7) end Damper;
```

La línea 1 del código indica el tipo de clase de la que se trata, en este caso se trata de un modelo. Al lado entre comillas aparece una anotación que explica que se trata de un amortiguador lineal de un grado de libertad.

A continuación, la línea 2 del código contiene la referencia de la clase de las que el modelo está heredando. El modelo del que se hereda va precedido de la palabra “extends”. El mecanismo de herencia aparece explicado en el apartado 5.1.2.5. En este caso, la superclase del modelo “damper” es “PartialCompliantWithRelativeStates”.

La línea 3 del código es la de definición de los parámetros de que consta el modelo. Las variables pueden ser de diferentes tipos:

- Parámetros constantes: Poseen un valor predefinido, se define antes de la ejecución y su valor no cambia durante la misma. Va precedido por la palabra “parameter”.
- Parámetros variables: Su valor es variable durante la ejecución y depende de las operaciones internas del programa. Para su definición no es necesario que vaya precedido de ninguna palabra.
- Constantes universales: Se trata de constantes predefinidas en la librería de constantes de *Modelica* cuyo valor es universal. Va precedido por la palabra “constant”

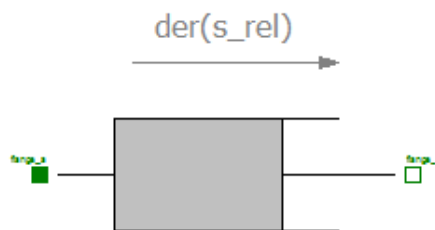
## Capítulo 5: El modelado de sistemas dinámicos

---

La línea 4 del código posee la palabra “equation”, a partir de aquí se declaran las expresiones y operaciones que debe llevar a cabo el programa durante la ejecución.

Las últimas líneas de código van precedidos de la palabra “annotation” y se emplean para definir gráficamente el modelo, es decir se emplea un sistema de coordenadas para proveer al modelo de un aspecto, esta parte del código se divide en dos, la primera es donde se define el aspecto que tendrá el modelo cuando se visualiza por separado, en la pantalla aparece únicamente el modelo. La otra división pertenece al aspecto que tendrá el modelo a la hora de conectarlo con otros modelos.

La figura 5.2 muestra el aspecto que posee el amortiguador lineal definido en *Modelica*.



*Figura 5.2: Aspecto del modelo amortiguador lineal modelado en Modelica*

---

## Capítulo 6

# Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

---

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

---

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es el de crear las librerías de tres modelos de amortiguadores magneto-reológicos en Modelica, ya que las librerías de Modelica ofrecen al usuario únicamente la versión más simple de un amortiguador, el modelo lineal (model damper). Para llevar a cabo los objetivos se han utilizado tres programas informáticos:

- *Free Modelica Editor* es una herramienta utilizada como editor para lenguaje Modelica que proporciona plantillas de texto, sistema de resaltado de sintaxis y ayuda a la hora de la programación haciéndola más sencilla para el usuario. Se ha utilizado este software para:
  - Modificar el paquete de unidades del sistema internacional que posee *OpenModelica Connection Editor* para introducir unidades inexistentes en dicho paquete.
  - Crear el siguiente modelo en el paquete *Modelica.Mechanics.Translational.Interfaces*:
    - ***Partial model PartialCompliantMechanicsElectric***: Conector utilizado en los modelos con entrada de voltaje externa.
  - Crear los siguientes modelos en el paquete *Modelica.Mechanics.Translational.Components*.
    - ***Model BoucWen***: Modelo Bouc-Wen modificado.
    - ***Model ModifiedDahlModel***: Modelo Dahl modificado.
    - ***Model Algebraicmodel***: Modelo Algebraico modificado.
    - ***Model AlgebraicmodelVolt***: Modelo Algebraico modificado con entrada de voltaje externa.
    - ***Model BoucWenVolt***: Modelo Bouc-Wen modificado con entrada de voltaje externa.
    - ***Model ModifiedDahlModelVolt***: Modelo Dahl modificado con entrada de voltaje externa.
- *OpenModelica Connection Editor*, es un software de modelado de sistemas dinámicos, que contiene multitud de librerías con modelos que van desde modelos matemáticos de funciones a modelos de comportamiento térmico o

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

---

eléctrico. En este software se ha llevado a cabo la simulación de los modelos de amortiguadores creados. Para llevar a cabo las simulaciones de dichas librerías se imponen una serie de condiciones de contorno al modelo y se extrae información gráfica.

- *MatLab (Simulink)*, para poder contrastar los resultados obtenidos mediante *OpenModelica Connection Editor* se ha programado mediante bloques de función los mismos modelos de amortiguadores y posteriormente se han extraído los mismos resultados que en *Modelica* para comprobar la validez de los mismos.

Los modelos constan de la estructura explicada en el apartado 5.2.1. Los modelos simples heredan sus propiedades de “PartialCompliantWithRelativeStates”. Se trata de un conector que establece como parámetros la velocidad y el desplazamiento relativo entre los dos puntos extremos de un elemento mecánico, en este caso de un amortiguador. Así mismo, esta librería establece la relación existente entre la velocidad relativa y el desplazamiento relativo:

$$\dot{x} = der(x) \quad (6.1)$$

El código del conector “PartialCompliantWithRelativeStates” es el que sigue:

- 1) partial model PartialCompliantWithRelativeStates
- 2) "Base model for the compliant connection of two translational 1-dim. shaft flanges where the relative position and relative velocities are used as states"
- 3) parameter StateSelect stateSelect=StateSelect.prefer
- 4) "Priority to use phi\_rel and w\_rel as states"
- 5) Annotation(HideResult=true, Dialog(tab="Advanced"));
- 6) parameter SI.Distance s\_nominal=1e-4 "Nominal value of s\_rel (used for scaling)"  
annotation(Dialog(tab="Advanced"));
- 7) SI.Distance s\_rel(start=0, stateSelect=stateSelect, nominal=s\_nominal) "Relative distance (= flange\_b.s - flange\_a.s)";
- 8) SI.Velocity v\_rel(start=0, stateSelect=stateSelect) "Relative velocity (= der(s\_rel))";
- 9) SI.Force f "Forces between flanges (= flange\_b.f)";

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
10) Translational.Interfaces.Flange_a flange_a "Left flange of compliant 1-dim.
    translational component" annotation (Placement(transformation(extent={{-110,-10},{-
    90,10}}, rotation=0)));
11) Translational.Interfaces.Flange_b flange_b "Right flange of compliant 1-dim.
    translational component" annotation (Placement(transformation(extent={{90,-
    10},{110,10}}, rotation=0)));
12) equation
13) s_rel = flange_b.s - flange_a.s;
14) v_rel = der(s_rel);
15) flange_b.f = f;
16) flange_a.f = -f;
17) annotation ()
18) end PartialCompliantWithRelativeStates;
```

Los modelos con entrada de voltaje externa se han creado para conseguir un modo de simulación más óptimo en el que el voltaje se pueda modificar sin necesidad de cambiar el código o tener conocimientos de programación en Modelica. Para ello se creó un nuevo conector que con un “pin” de entrada de voltaje a parte de los dos que tenía para entrada de fuerza o desplazamiento. De esta manera, el modelo con entrada de voltaje externa hereda las propiedades del nuevo conector “PartialCompliantMechanicsElectric”.

El código del conector “PartialCompliantMechanicsElectric” es el que sigue:

```
1) partial model PartialCompliantMechanicsElectric
2) "Base model for the compliant connection of two translational 1-dim. shaft flanges
    where the relative position and relative velocities are used as states"
3) parameter StateSelect stateSelect=StateSelect.prefer "Priority to use phi_rel and w_rel
    as states" annotation(HideResult=true, Dialog(tab="Advanced"));
4) parameter SI.Distance s_nominal=1e-4 "Nominal value of s_rel (used for scaling)"
    annotation(Dialog(tab="Advanced"));
5) Modelica.Electrical.Analog.Interfaces.PositivePin p "Positive pin Positive pin (potential
    p.v > n.v for positive voltage drop v)" annotation (Placement(transformation(extent={{-
    10,70},{10,90}}, rotation=0)));
```

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
6) SI.Distance s_rel(start=0, stateSelect=stateSelect, nominal=s_nominal)"Relative
   distance (= flange_b.s - flange_a.s)";
7) SI.Velocity v_rel(start=0, stateSelect=stateSelect)"Relative velocity (= der(s_rel))";
8) SI.Force f "Forces between flanges (= flange_b.f)";
9) Modelica.Mechanics.Translational.Interfaces.Flange_a flange_a"Left flange of
   compliant 1-dim. translational component" annotation
   (Placement(transformation(extent={{-110,-10},{-90,10}}, rotation=0)));
10) Modelica.Mechanics.Translational.Interfaces.Flange_b flange_b"Right flange of
   compliant 1-dim. translational component" annotation
   (Placement(transformation(extent={{90,-10},{110,10}}, rotation=0)));
11) SI.Voltage v (start = 0);
12) SI.Current i (start = 0);
13) equation
14) s_rel = flange_b.s - flange_a.s;
15) v_rel = der(s_rel);
16) flange_b.f = f;
17) flange_a.f = -f;
18) v = p.v;
19) 0 = p.i;
20) i = p.i;
21) annotation ()
22) end PartialCompliantMechanicsElectric;
```

### 6.1. Modelo Bouc-Wen

A continuación, se muestran los códigos programados para el modelo Bouc-Wen. El primero con el valor del voltaje programable internamente y el segundo con la entrada de voltaje externa.

#### 6.1.1. Modelo Bouc-Wen simple

El código del modelo Bouc-Wen simple es el siguiente:

```
1) model BoucWen
2) extends Translational.Interfaces.PartialCompliantWithRelativeStates;
3) parameter SI.TranslationalDampingConstant c0a(final min = 0, start = 1) "Damper 0a ";
```

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
4) parameter SI.Boucwendampervolt c0b(final min = 0, start = 1) "Damper 0b ";
5) parameter SI.TranslationalSpringConstant k0(final min = 0, start = 1) "Spring 0 ";
6) parameter SI.TranslationalDampingConstant c1a(final min = 0, start = 1) "Damper 1a ";
7) parameter SI.Boucwendampervolt c1b(final min = 0, start = 1) "Damper 1b ";
8) SI.TranslationalDampingConstant c0(final min = 0, start = 1) "Damper 0 ";
9) SI.TranslationalDampingConstant c1(final min = 0, start = 1) "Damper 1 ";
10) parameter SI.TranslationalSpringConstant k1(final min = 0, start = 1) "Spring 1";
11) parameter SI.Distance sx_rel0(final min = 0, start = 1) "x0";
12) SI.Distance sy_rel(start = 0) "distance flange_c - flange_b";
13) SI.Distance sz_rel(start = 0) "distance defects boucwen";
14) SI.Distance s_u(start = 0);
15) SI.Velocity v_u(start = 0);
16) SI.Velocity vy_rel(start = 0);
17) SI.Velocity vz_rel(start = 0);
18) parameter SI.TranslationalSpringConstant alfaa(final min = 0, start = 1) "parameter alfa
    a";
19) parameter SI.Boucwenpringvolt alfab(final min = 0, start = 1) "parameter alfa b";
20) SI.TranslationalSpringConstant alfa(final min = 0, start = 1) "parameter alfa";
21) parameter SI.Boucwenareainv gamma(final min = 0, start = 3630000) "parameter
    gamma";
22) parameter SI.Boucwenareainv beta(final min = 0, start = 3630000) "parameter beta";
23) parameter SI.nounit A(final min = 0, start = 301) "parameter A";
24) parameter SI.nounit N(final min = 0, start = 2) "parameter N";
25) parameter SI.Frequency eta(final min = 0, start = 190) "parameter eta";
26) SI.Voltage v(final min = 0, start = 1) "parameter V";
27) equation
28) v = 1.25;
29) v_u = der(s_u);
30) vy_rel = der(sy_rel);
31) vz_rel = der(sz_rel);
32) v_u = -eta * (s_u - v);
33) c1 = c1a + c1b * s_u;
34) c0 = c0a + c0b * s_u;
35) alfa = alfaa + alfab * s_u;
36) vy_rel = ((1 / (c0 + c1)) * (alfa * sz_rel + c0 * v_rel + k0 * (s_rel - sy_rel)));
```



## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
37) vz_rel = -gamma * abs(v_rel - vy_rel) * sz_rel * abs(sz_rel) ^ (N - 1) - beta * (v_rel -  
    vy_rel) * abs(sz_rel) ^ N + A * (v_rel - vy_rel);  
38) f = c1 * vy_rel + k1 * (s_rel - sx_rel0);  
39) annotation(  
40) end BoucWen;
```

El diseño del dibujo ha sido modificado en sus dos versiones a partir del dibujo del amortiguador simple. En este caso, se ha añadido una flecha que atraviesa el cuerpo del amortiguador y la inscripción BOUC-WEN en el centro del mismo. Las figuras 6.1 y 6.2 muestran el resultado final.

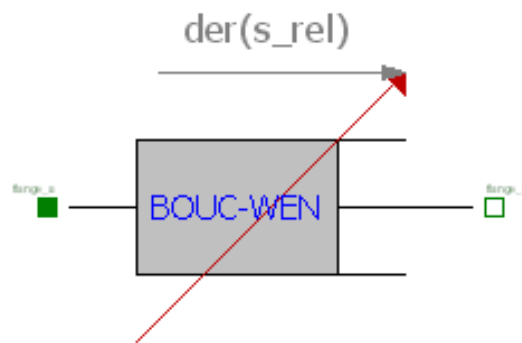


Figura 6.1: Vista principal del modelo Bouc-Wen

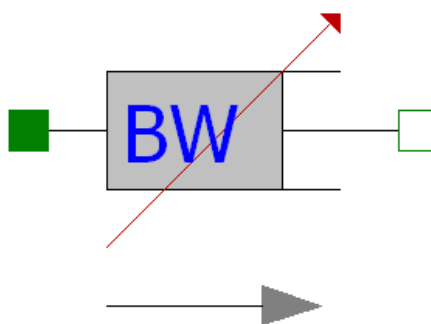


Figura 6.2: Vista secundaria del modelo Bouc-Wen

### 6.1.2. Modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa

El código del modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa es el siguiente:

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
1) model BoucWenVolt
2)   extends
      Modelica.Mechanics.Translational.Interfaces.PartialCompliantMechanicsElectric;
3)   parameter SI.TranslationalDampingConstant c0a(final min = 0, start = 1) "Damper 0a ";
4)   parameter SI.Boucwendampervolt c0b(final min = 0, start = 1) "Damper 0b ";
5)   parameter SI.TranslationalSpringConstant k0(final min = 0, start = 1) "Spring 0 ";
6)   parameter SI.TranslationalDampingConstant c1a(final min = 0, start = 1) "Damper 1a ";
7)   parameter SI.Boucwendampervolt c1b(final min = 0, start = 1) "Damper 1b ";
8)   SI.TranslationalDampingConstant c0(final min = 0, start = 1) "Damper 0 ";
9)   SI.TranslationalDampingConstant c1(final min = 0, start = 1) "Damper 1 ";
10)  parameter SI.TranslationalSpringConstant k1(final min = 0, start = 1) "Spring 1";
11)  parameter SI.Distance sx_rel0(final min = 0, start = 1) "x0";
12)  SI.Distance sy_rel(start = 0) "distance flange_c - flange_b";
13)  SI.Distance sz_rel(start = 0) "distance defects boucwen";
14)  SI.Distance s_u(start = 0);
15)  SI.Velocity v_u(start = 0);
16)  SI.Velocity vy_rel(start = 0);
17)  SI.Velocity vz_rel(start = 0);
18)  parameter SI.TranslationalSpringConstant alfaa(final min = 0, start = 1) "parameter alfa a";
19)  parameter SI.Boucwenareainv alfab(final min = 0, start = 1) "parameter alfa b";
20)  SI.TranslationalSpringConstant alfa(final min = 0, start = 1) "parameter alfa";
21)  parameter SI.Boucwenareainv gamma(final min = 0, start = 3630000) "parameter gamma";
22)  parameter SI.Boucwenareainv beta(final min = 0, start = 3630000) "parameter beta";
23)  parameter SI.nounit A(final min = 0, start = 301) "parameter A";
24)  parameter SI.nounit N(final min = 0, start = 2) "parameter n";
25)  parameter SI.Frequency eta(final min = 0, start = 190) "parameter eta";
26)  equation
27)    v_u = der(s_u);
28)    vy_rel = der(sy_rel);
29)    vz_rel = der(sz_rel);
30)    v_u = -eta * (s_u - v);
31)    c1 = c1a + c1b * s_u;
32)    c0 = c0a + c0b * s_u;
33)    alfa = alfaa + alfab * s_u;
34)    vy_rel = (1 / (c0 + c1)) * (alfa * sz_rel + c0 * v_rel + k0 * (s_rel - sy_rel));
```

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
35) vz_rel = -gamma * abs(v_rel - vy_rel) * sz_rel * abs(sz_rel) ^ (N - 1) - beta * (v_rel -  
    vy_rel) * abs(sz_rel) ^ N + A * (v_rel - vy_rel);  
36) f = c1 * vy_rel + k1 * (s_rel - sx_rel0);  
37) annotation(  
38) end BoucWenVolt;
```

El aspecto que posee este modelo es similar al modelo simple con excepción de la aparición de un “pin” eléctrico en la parte superior del amortiguador, las figuras 6.3 y 6.4 muestran el aspecto de este modelo.

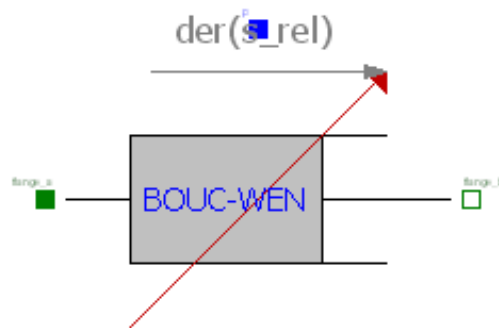


Figura 6.3: Vista principal del modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa

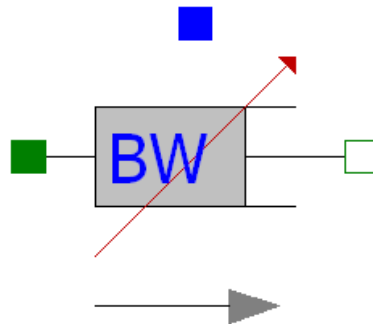


Figura 6.4 Vista secundaria del modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa

### 6.2. Modelo Dahl modificado

A continuación, se muestran igual que en el apartado 6.3 los dos modelos programados para el modelo Dahl modificado. El primero con el valor del voltaje programable internamente y el segundo con la entrada de voltaje externa.

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

---

### 6.2.1. Modelo Dahl simple

El código de la librería correspondiente al modelo Dahl modificado es el siguiente:

```
1) model ModifiedDahlModel
2) extends Translational.Interfaces.PartialCompliantWithRelativeStates;
3) parameter SI.TranslationalDampingConstant c0s(final min = 0, start = 1) "Damper 0s ";
4) parameter SI.Boucwendampervolt c0d(final min = 0, start = 1) "Damper 0d ";
5) parameter SI.TranslationalSpringConstant k0(final min = 0, start = 1) "Spring 0 ";
6) SI.TranslationalDampingConstant c0(final min = 0, start = 1) "Damper 0";
7) SI.Distance sz_rel(start = 0) "distance defects";
8) SI.Distance s_u(start = 0);
9) SI.Velocity v_u(start = 0);
10) SI.Velocity vz_rel(start = 0);
11) parameter SI.Dahldistanceinv sigma(final min = 0, start = 50000) "parameter sigma";
12) parameter SI.Frequency eta(final min = 0, start = 200) "parameter eta";
13) parameter SI.Voltage v(final min = 0, start = 1) "parameter v";
14) parameter SI.Force Fds(final min = 0, start = 2000) "parameter Fds";
15) parameter SI.Dahlforcevolt Fdd(final min = 0, start = 15000) "parameter Fdd";
16) parameter SI.Force F0(final min = 0, start = 0) "parameter F0";
17) SI.Force Fd(final min = 0, start = 1) "parameter Fd";
18) SI.nounit A(final min = 0, start = 1) "parameter A";
19) equation
20) v_u = der(s_u);
21) vz_rel = der(sz_rel);
22) v_u = -eta * (s_u - v);
23) c0 = c0s + (c0d * s_u);
24) Fd = Fds + (Fdd * s_u);
25) A = sign(v_rel);
26) vz_rel = sigma * v_rel * (1 - sz_rel * A);
27) f = (k0 * s_rel) + (c0 * v_rel) + (Fd * sz_rel) - F0;
28) annotation()
29) end ModifiedDahlModel;
```

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

El diseño ha sido modificado para poder distinguirlo del resto de modelos. Se ha añadido una flecha que atraviesa el cuerpo del amortiguador y la inscripción DAHL en el centro del mismo. Las figura 6.5 y 6.6 muestran el aspecto del modelo Dahl.

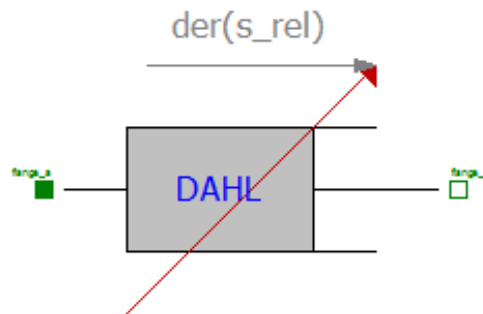


Figura 6.5: Vista principal del modelo Dahl

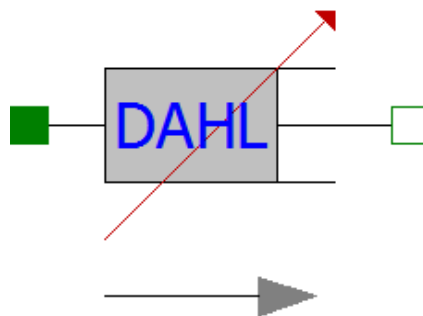


Figura 6.6: Vista secundaria del modelo Dahl

### 6.2.2. Modelo Dahl con entrada de voltaje externa

El código del modelo Dahl con entrada de voltaje externa es el siguiente:

```
1) model ModifiedDahlModelVolt
2) extends
    Modelica.Mechanics.Translational.Interfaces.PartialCompliantMechanicsElectric;
3) parameter SI.TranslationalDampingConstant c0s(final min = 0, start = 1) "Damper 0s ";
4) parameter SI.Boucwendampervolt c0d(final min = 0, start = 1) "Damper 0d ";
5) parameter SI.TranslationalSpringConstant k0(final min = 0, start = 1) "Spring 0 ";
6) SI.TranslationalDampingConstant c0(final min = 0, start = 1) "Damper 0";
7) SI.Distance sz_rel(start = 0) "distance defects";
8) SI.Distance s_u(start = 0);
```

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
9) SI.Velocity v_u(start = 0);
10) SI.Velocity vz_rel(start = 0);
11) parameter SI.Dahldistanceinv sigma(final min = 0, start = 50000) "parameter sigma";
12) parameter SI.Frequency eta(final min = 0, start = 200) "parameter eta";
13) parameter SI.Force Fds(final min = 0, start = 2000) "parameter Fds";
14) parameter SI.Dahlforcevolt Fdd(final min = 0, start = 15000) "parameter Fdd";
15) parameter SI.Force F0(final min = 0, start = 0) "parameter F0";
16) SI.Force Fd(final min = 0, start = 1) "parameter Fd";
17) SI.nounit A(final min = 0, start = 1) "parameter A";
18) equation
19) v_u = der(s_u);
20) vz_rel = der(sz_rel);
21) v_u = -eta * (s_u - v);
22) c0 = c0s + (c0d * s_u);
23) Fd = Fds + (Fdd * s_u);
24) A = sign(v_rel);
25) vz_rel = sigma * v_rel * (1 - sz_rel * A);
26) f = (k0 * s_rel) + (c0 * v_rel) + (Fd * sz_rel) - F0;
27) annotation()
28) end ModifiedDahlModelVolt;
```

El aspecto del modelo es igual que en el Dahl similar al modelo simple con excepción de la aparición de un “pin” eléctrico en la parte superior del amortiguador, figuras 6.7 y 6.8.

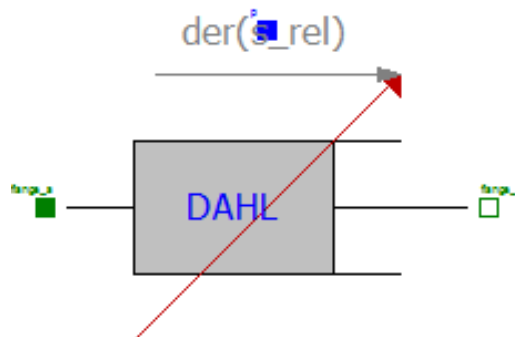


Figura 6.7: Vista principal del modelo Dahl con entrada de voltaje externa

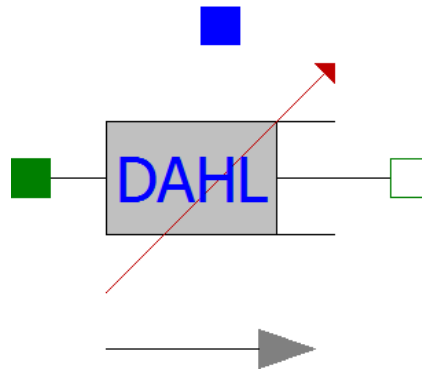


Figura 6.8: Vista secundaria del modelo Dahl con entrada de voltaje externa

### 6.3. Modelo Algebraico

A continuación, se muestran los dos modelos programados para el modelo algebraico modificado. El primero con el valor del voltaje programable internamente y el segundo con la entrada de voltaje externa.

#### 6.3.1. Modelo algebraico simple

El código del modelo algebraico simple es el siguiente:

```
1) model Algebraicmodel
2) extends Translational.Interfaces.PartialCompliantWithRelativeStates;
3) SI.TranslationalDampingConstant cb(final min = 0, start = 1) "Damper";
4) parameter SI.TranslationalSpringConstant k(final min = 0, start = 1) "Spring constant";
5) SI.Velocity v0(final min = 0, start = 1) "Velocity 0";
6) SI.Acceleration a_rel(start = 0);
7) SI.Force Fy(final min = 0, start = 1) "parameter Fy";
8) parameter SI.Force F0(final min = 0, start = 1) "parameter F0";
9) SI.nounit A(final min = 0, start = 1) "parameter A";
10) SI.nounit B(final min = 0, start = 1) "parameter B";
11) SI.nounit C(final min = 0, start = 1) "parameter C";
12) parameter SI.Voltage V(final min = 0, start = 1) "Voltage";
13) protected
14) constant Real pi = Modelica.Constants.pi;
15) equation
16) a_rel = der(v_rel);
```

## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

```
17) cb = 1.51 / (1 + (10.34 *(exp(-1.04 * V))));  
18) Fy = 710 / (1 + (exp(-1.1*(V - 2.3))));  
19) v0 = 40 / (1 + (1.81 * (exp(-0.2 * V))));  
20) A = sign(a_rel);  
21) B = k * (v_rel - v0 * A);  
22) C = 2 / pi;  
23) f = F0 + (cb * v_rel) + (C * Fy * atan(B));  
24) annotation();  
25) end Algebraicmodel;
```

El diseño del dibujo ha sido modificado en sus dos versiones a partir del dibujo del amortiguador, se ha añadido una flecha que atraviesa el cuerpo del amortiguador y la inscripción ALGEBRAIC en el centro del mismo figura 6.9 y 6.10.

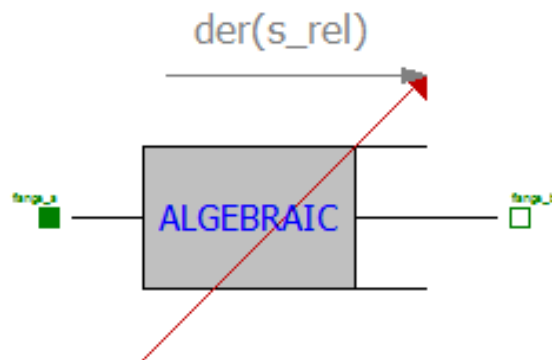


Figura 6.9: Vista principal del modelo algebraico

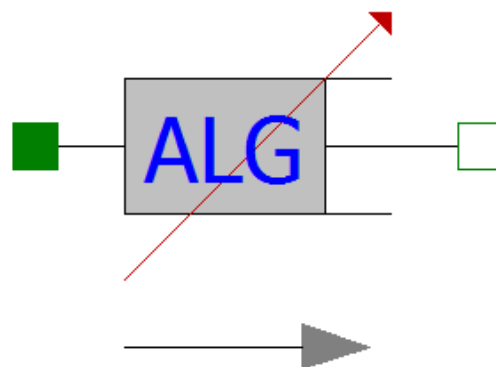


Figura 6.10: Vista secundaria del modelo algebraico



## Capítulo 6: Modelado de amortiguadores magneto-reológicos mediante *Modelica*

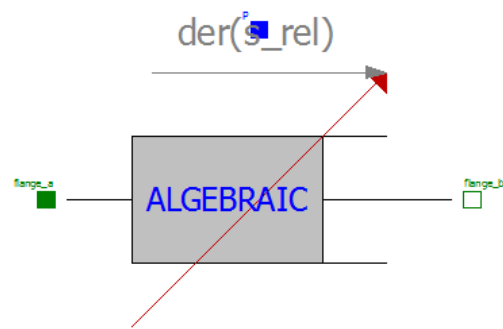
---

### 6.3.2. *Modelo Algebraico con entrada de voltaje externa*

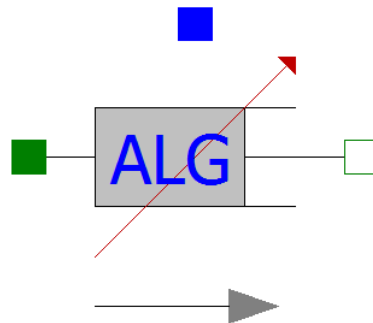
El código del modelo algebraico con entrada de voltaje externa es el siguiente:

```
1) model Algebraicmodelvolt
2) extends Translational.Interfaces.PartialCompliantMechanicsElectric;
3) SI.TranslationalDampingConstant cb(final min = 0, start = 1) "Damper";
4) parameter SI.TranslationalSpringConstant k(final min = 0, start = 1) "Spring constant";
5) SI.Velocity v0(final min = 0, start = 1) "Velocity 0";
6) SI.Acceleration a_rel(start = 0);
7) SI.Force Fy(final min = 0, start = 1) "parameter Fy";
8) parameter SI.Force F0(final min = 0, start = 1) "parameter F0";
9) SI.nounit A(final min = 0, start = 1) "parameter A";
10) SI.nounit B(final min = 0, start = 1) "parameter B";
11) SI.nounit C(final min = 0, start = 1) "parameter C";
12) protected
13) constant Real pi = Modelica.Constants.pi;
14) equation
15) a_rel = der(v_rel);
16) cb = 1.51 / (1 + (10.34 * (exp(-1.04 * v))));
17) Fy = 710 / (1 + (exp(-1.1 * (v - 2.3))));
18) v0 = 40 / (1 + (1.81 * (exp(-0.2 * v))));
19) A = sign(a_rel);
20) B = k * (v_rel - v0 * A);
21) C = 2 / pi;
22) f = F0 + (cb * v_rel) + (C * Fy * atan(B));
23) annotation();
24) end Algebraicmodelvolt;
```

El aspecto que posee este modelo es similar al modelo simple con excepción de la aparición de un “pin” eléctrico en la parte superior del amortiguador, las figuras 6.11 y 6.12 muestran el aspecto de este modelo.



*Figura 6.11: Vista principal del modelo algebraico con entrada de voltaje externa*



*Figura 6.12 Vista secundaria del modelo algebraico con entrada de voltaje externa*

---

## Capítulo 7

# Resultados de simulación

---

---

## Capítulo 7: Resultados de simulación

---

Para llevar a cabo el objetivo del trabajo se han extraído las curvas características de cada modelo de amortiguador magneto-reológico mediante *OpenModelica Connection Editor* y *Simulink*.

El sistema dinámico utilizado para la simulación de los modelos sin entrada de voltaje externa consta de los siguientes elementos:

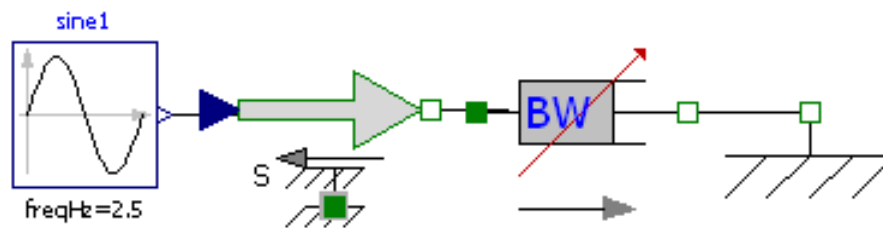
- Fuente de excitación senoidal.
- Transformador de señal a desplazamiento.
- Amortiguador magneto-reológico.
- Encastramiento que restringe el movimiento de uno de los conectores del amortiguador.

El sistema dinámico utilizado para la simulación de los modelos con entrada de voltaje externa es ligeramente diferente y consta de varios elementos adicionales:

- Fuente de excitación senoidal.
- Transformador de señal a desplazamiento.
- Amortiguador.
- Encastramiento que restringe el movimiento de uno de los polos del amortiguador.
- Señal de voltaje constante.
- Toma de tierra.

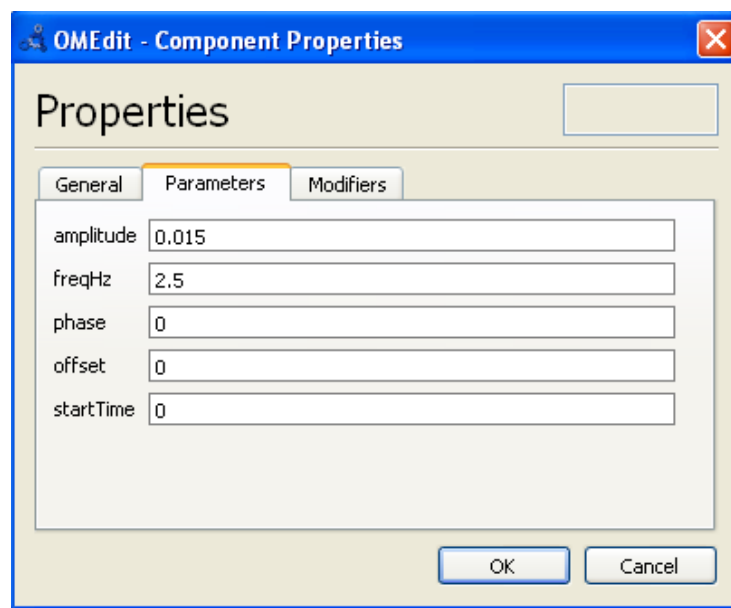
### **7.1. Modelo Bouc-Wen simple**

En primer lugar se ha simulado el comportamiento del modelo Bouc-Wen simple, para ello se ha utilizado el sistema dinámico descrito en el capítulo 7 para los modelos simples, cuyo aspecto es el que aparece en la figura 7.1:



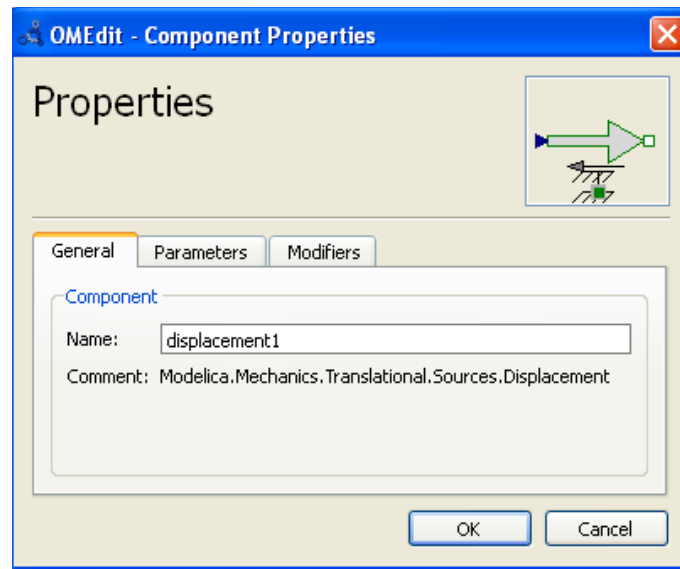
*Figura 7.1: Sistema dinámico Bouc-Wen simple*

Para llevar a cabo la simulación, es necesario establecer el valor de las entradas de los diferentes elementos del sistema. La figura 7.2 muestra las entradas de la fuente de excitación senoidal (Modelica.Blocks.Sources.Sine), los parámetros que se han introducido son la amplitud [m] y la frecuencia [Hz] a la que debe ser excitado el sistema.



*Figura 7.2: Pantalla de parámetros de la fuente de excitación senoidal*

La figura 7.3 muestra el panel de las entradas del elemento transformador de la señal en desplazamiento (Modelica.Mechanics.Translational.Sources), este elemento no posee ninguna entrada.

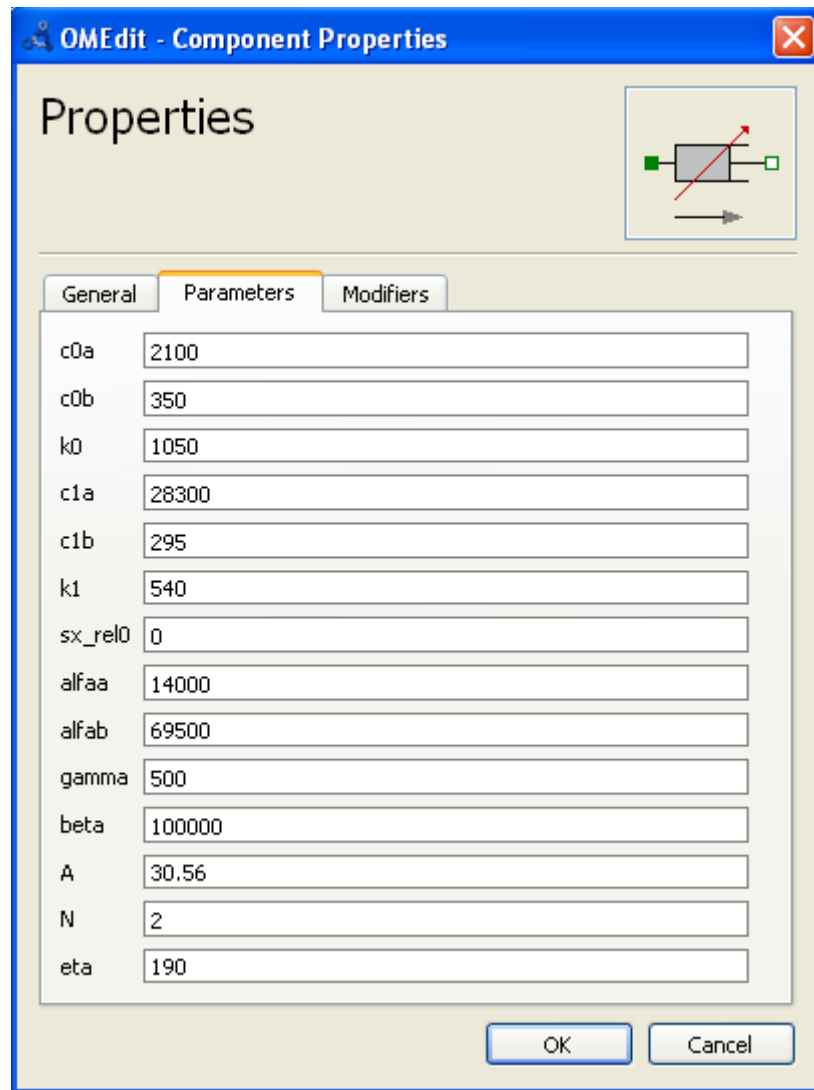


*Figura 7.3: Pantalla de parámetros del transformador de desplazamiento*

La figura 7.4 muestra el panel de entradas pertenecientes al amortiguador (Modelica.Mechanics.Translational.Components.BoucWen). Los parámetros son los que aparecen en la tabla 7.1.

*Tabla 7.1: Parámetros del amortiguador modelo Bouc-Wen*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>
$c_{0a}$	N·s/m
$c_{0b}$	N·s/m·V
$k_0$	N/m
$c_{1a}$	N·s/m
$c_{1b}$	N·s/m·V
$k_1$	N/m
$sx\_rel0$	m
$alfaa$	N/m
$alfab$	N·s/m·V
$gamma$	$m^{-2}$
$beta$	$m^{-2}$
$A$	-
$N$	-
$eta$	$s^{-1}$



*Figura 7.4: Pantalla de parámetros del amortiguador*

En la figura 7.5 aparecen los parámetros de entrada del encastramiento (Modelica.Mechanics.Translational.Components.Fixed), en este caso aparece un desplazamiento inicial [m] que se deja sin valor ya que el efecto que tiene es el de descentrar la curva del amortiguador.

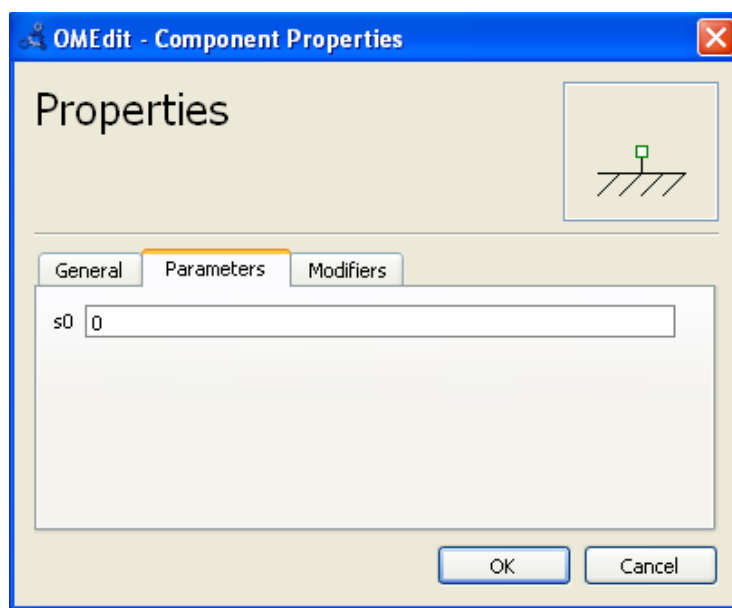


Figura 7.5: Pantalla de parámetros del encastramiento

### 7.2. Modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa

El esquema de la figura 7.6 es el del sistema dinámico correspondiente al modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa. Como se aprecia aparecen dos nuevos elementos eléctricos correspondientes a la excitación del voltaje de alimentación al amortiguador magneto-reológico.

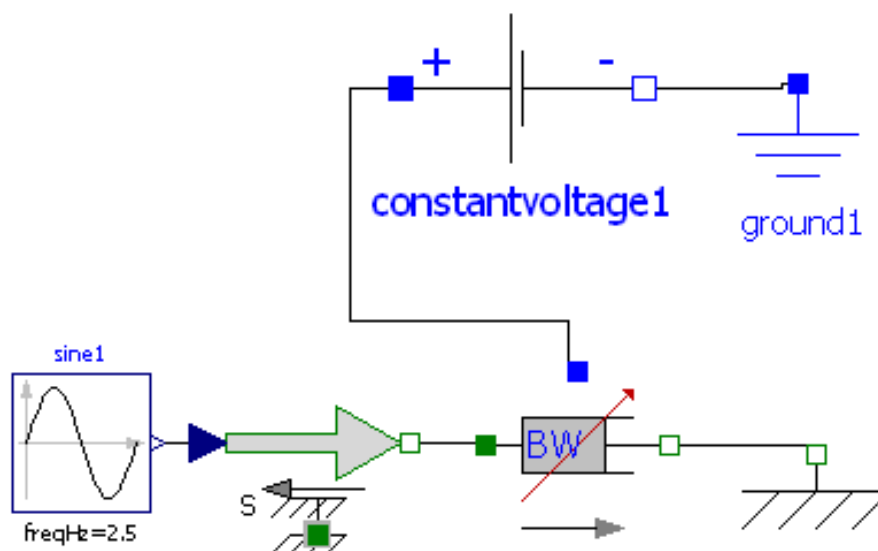


Figura 7.6: Sistema dinámico Bouc-Wen con entrada de voltaje externa

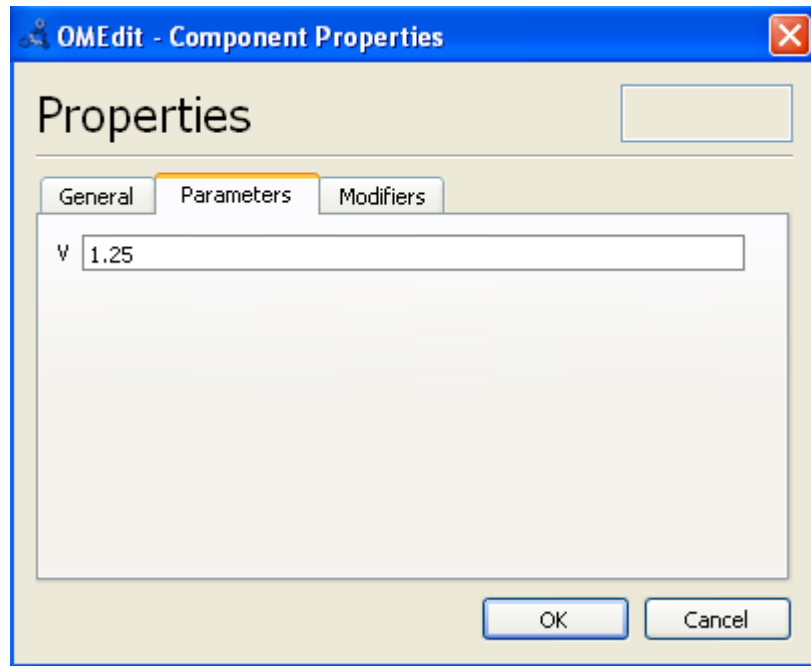


## Capítulo 7: Resultados de simulación

---

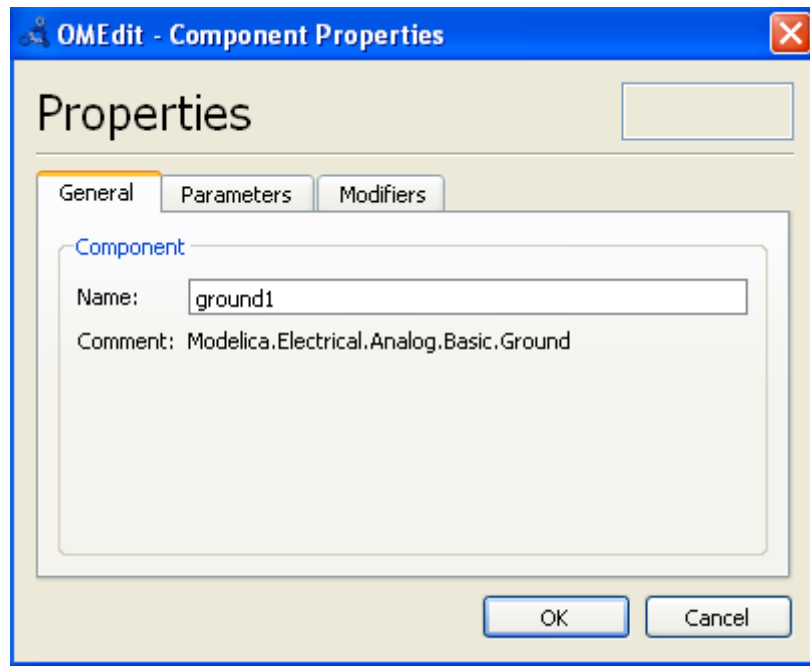
Los elementos comunes al anterior modelo no cambian sus entradas, a excepción de los dos nuevos elementos eléctricos y el amortiguador que pierde la entrada de voltaje ya que ese parámetro lo aporta el elemento de voltaje externo.

La figura 7.7 muestra los parámetros de entrada de la señal de voltaje.



*Figura 7.7: Pantalla de parámetros de la señal de voltaje*

La figura 7.8 muestra los parámetros de entrada de la toma de tierra, en este caso no se requiere ningún parámetro de entrada.



*Figura 7.8: Pantalla de parámetros de la toma de tierra*

Una vez se han introducido todos los parámetros de entrada requeridos en todos los elementos del sistema, el programa realiza una verificación del mismo y comprueba que es resoluble. A continuación, se selecciona el método de resolución en este caso el método “dassl”, con un tiempo base de 0.002 segundos.

Una vez el programa ha resuelto las ecuaciones y ha llegado a una solución válida se pueden extraer los resultados que se deseen. Se quieren extraer las curvas características del amortiguador, es decir, la curva fuerza vs desplazamiento y la curva fuerza vs velocidad. Las figuras 7.9 y 7.10 muestran las curvas características del modelo Bouc-Wen simple:

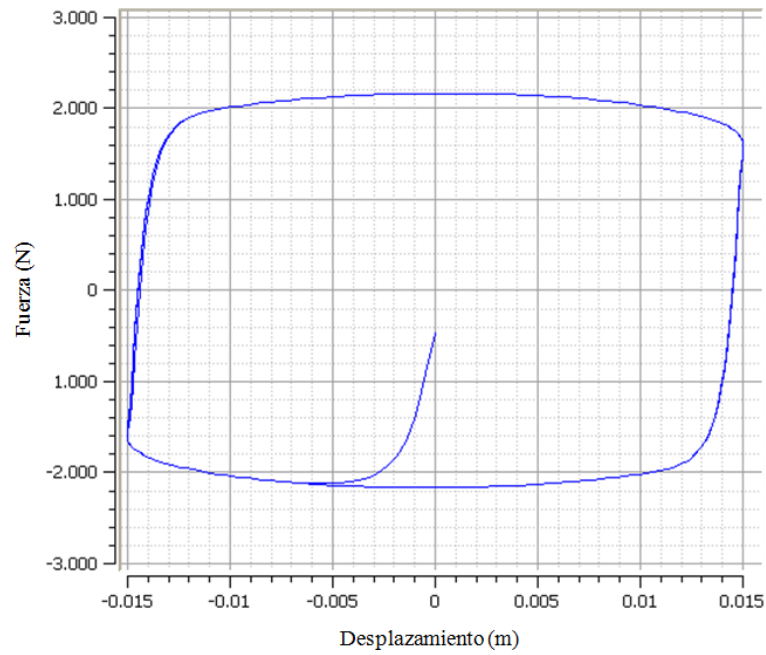


Figura 7.9: Curva de fuerza vs desplazamiento modelo Bouc-Wen simple

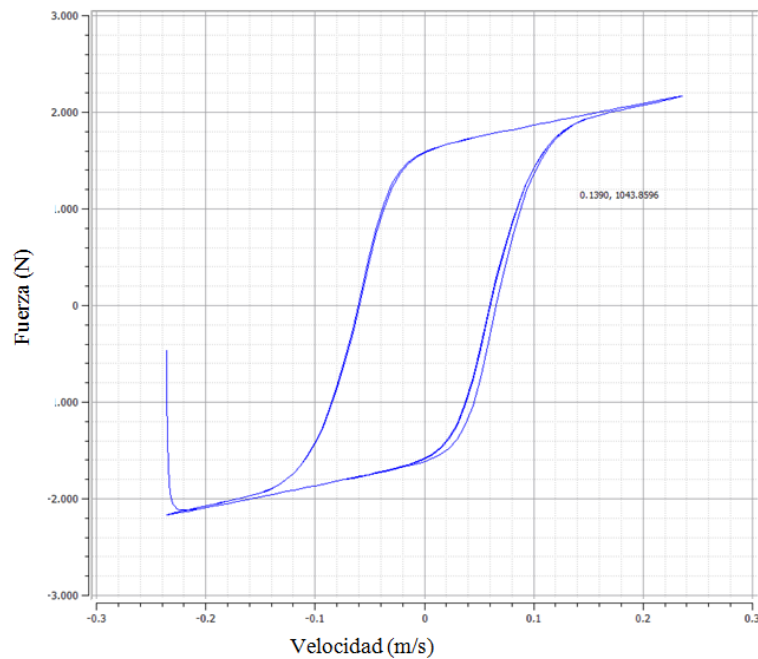
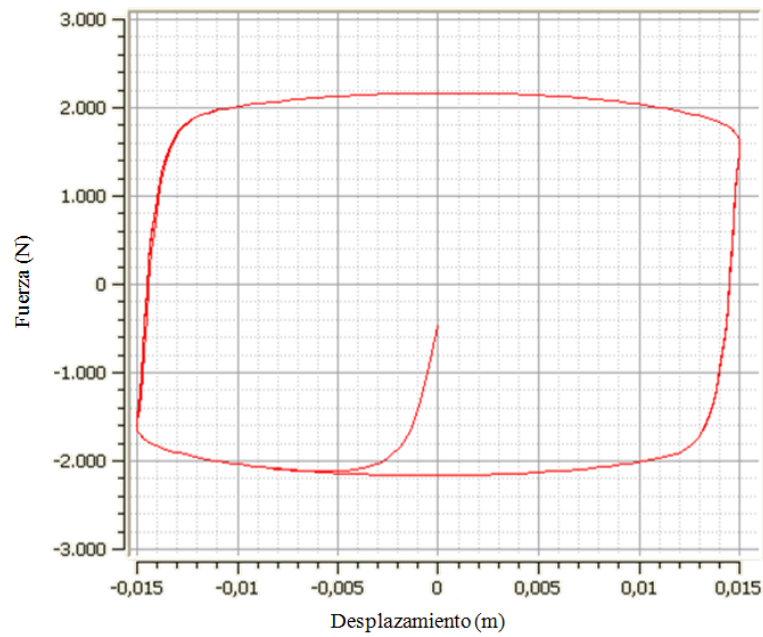
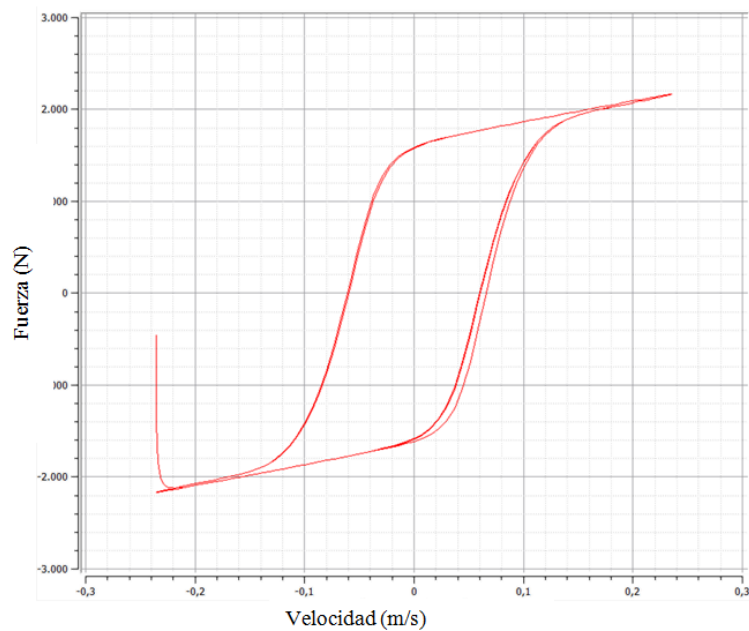


Figura 7.10: Curva de fuerza vs velocidad en el modelo Bouc-Wen simple

A continuación, las figuras 7.11 y 7.12 muestran las mismas curvas características obtenidas con el modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa.



*Figura 7.11: curva de fuerza vs desplazamiento en el modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa*



*Figura 7.12: Curva de fuerza vs velocidad en el modelo Bouc-Wen con entrada de voltaje externa*

Como se puede observar, las gráficas obtenidas con uno y otro modelo son idénticas, es decir, a primera vista contrastando ambos modelos se podía decir que el resultado conseguido es válido. Para contrastar de manera definitiva los resultados obtenidos, se programan las expresiones del modelo Bouc-Wen en *Simulink*.

## Capítulo 7: Resultados de simulación

La programación en *Simulink* se realiza mediante un lenguaje de bloques de función, mientras que en *OpenModelica Connection Editor* se utiliza un lenguaje acausal.

Utilizando *Simulink* se ha simulado el mismo sistema dinámico con idénticas condiciones de contorno, con el fin de comparar los resultados obtenidos anteriormente.

El método de resolución que se ha utilizado utiliza un tiempo base de 0.001 segundos y resuelve las ecuaciones mediante el método ode 5 (dormand-Prince)

El esquema de la programación en bloque del modelo Bouc-Wen se muestra en la figura 7.13.

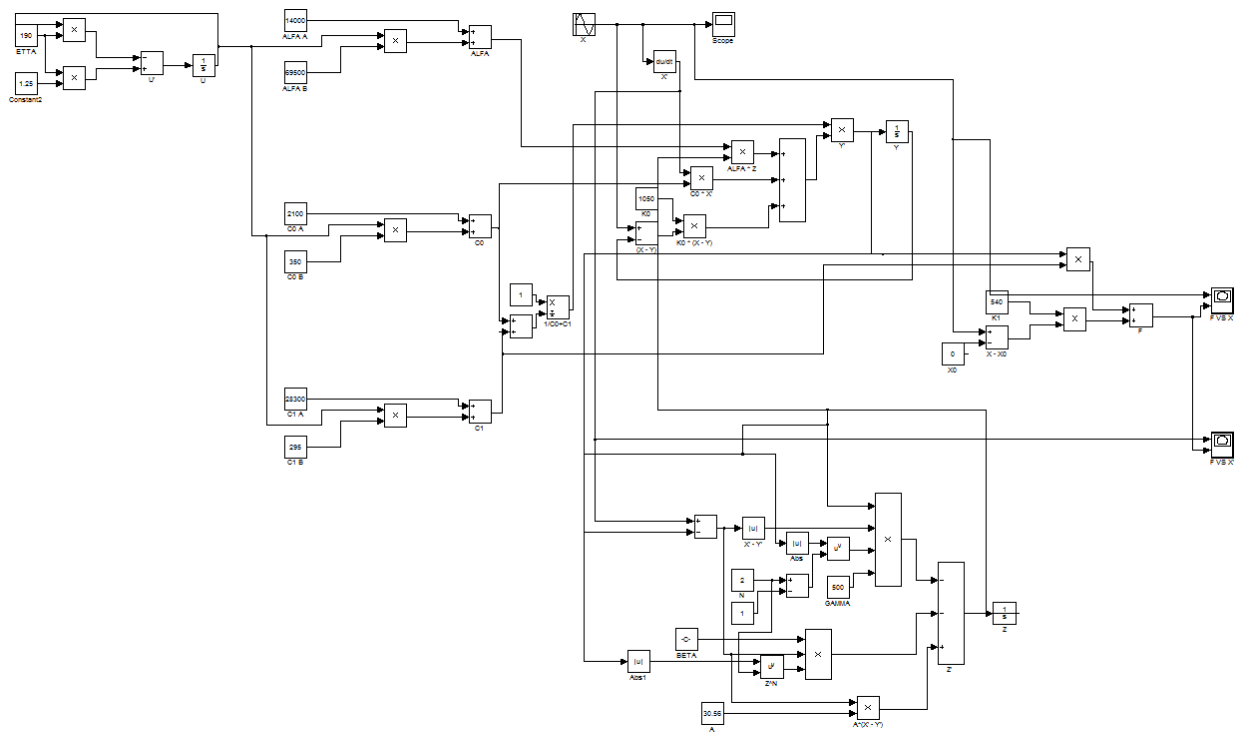
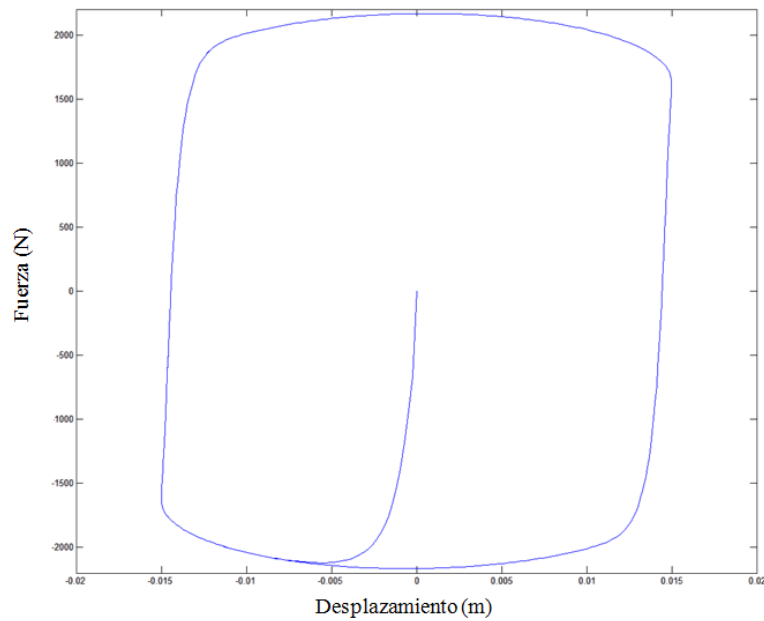
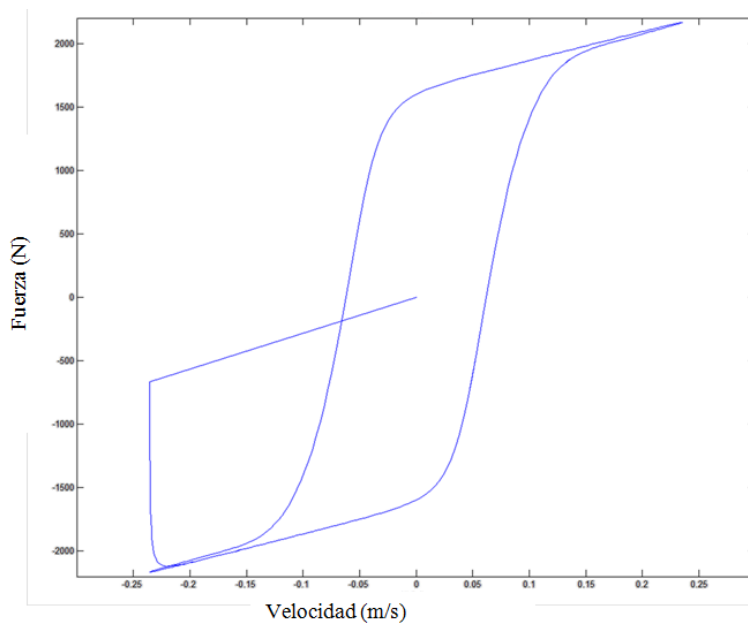


Figura 7.13: Esquema del modelo Bouc-Wen programado en Simulink

Las figuras 7.14 y 7.15 muestran los resultados obtenidos de la simulación del modelo Bouc-Wen mediante *Simulink*. Para contrastar los resultados con los obtenidos en el apartado anterior se han extraído las mismas curvas del amortiguador.



*Figura 7.14: Curva fuerza vs desplazamiento en el modelo Bouc-Wen con Simulink*



*Figura 7.15: curva fuerza vs velocidad en el modelo Bouc-Wen con Simulink*

Como se puede observar los resultados obtenidos con ambos software son prácticamente iguales. La única diferencia es la línea en la curva de fuerza vs velocidad obtenida con *Simulink*, que no aparece en los resultados obtenidos con *OpenModelica Connection Editor*. Esta diferencia se debe a los diferentes métodos de resolución utilizados en cada uno de los programas.

### 7.3. Modelo Dahl simple

El esquema del sistema dinámico con el amortiguador tipo Dahl se muestra en la figura 7.16.

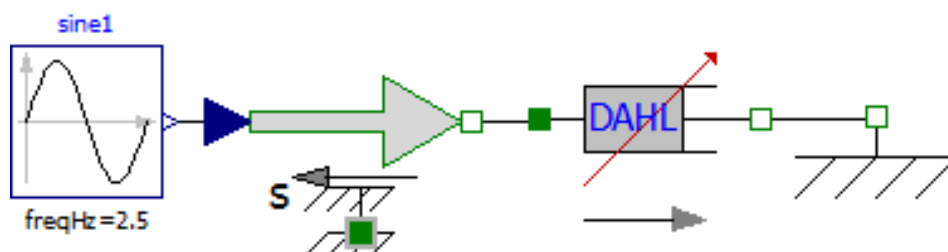


Figura 7.16: Sistema dinámico modelo Dahl simple

El único elemento que cambia sus entradas es el amortiguador magneto-reológico, ya que en este modelo se usa el modelo Dahl. Los demás elementos no cambian sus entradas con respecto al sistema del modelo Bouc-Wen simple. Asimismo el método de resolución utilizado tampoco cambia.

La figura 7.16 muestra los parámetros de entrada del amortiguador (Modelica.Mechanics.Translational.Components.modifieddahlmodel), los parámetros de entrada que se necesitan son los que aparecen en la tabla 7.2.

Tabla 7.2: Parámetros del amortiguador modelo Dahl

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>
$c_{0s}$	$N \cdot s/m$
$c_{0d}$	$N \cdot s/m \cdot V$
$k_0$	$N/m$
$\sigma$	$m^{-1}$
$\eta$	$s^{-1}$
$v$	$V$
$F_{ds}$	$N$
$F_{dd}$	$N/V$
$F_0$	$N$

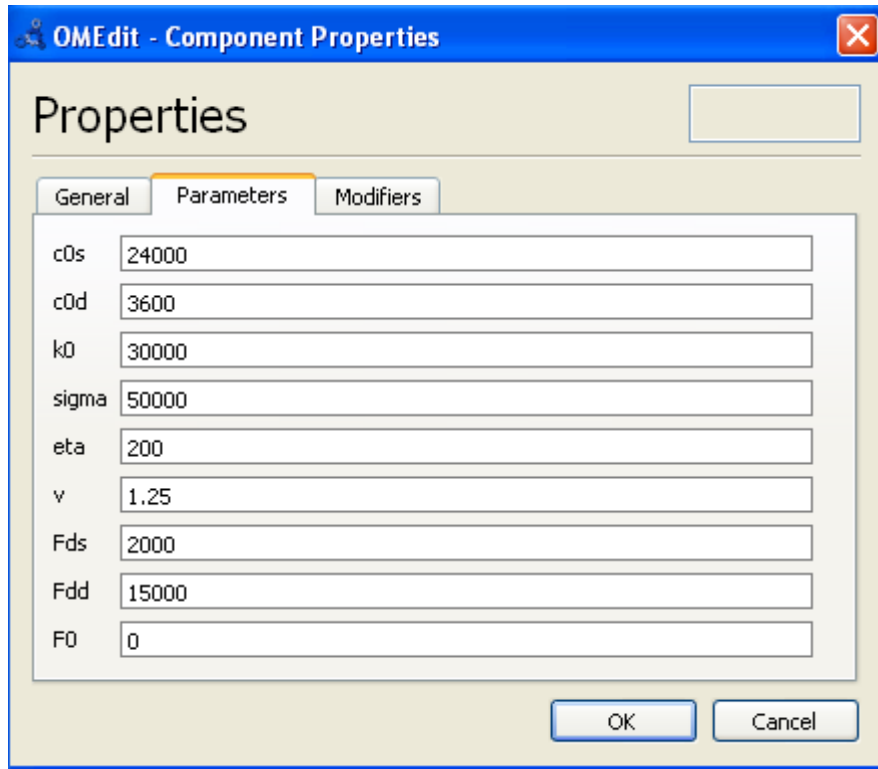


Figura 7.17: Pantalla de parámetros del amortiguador

### 7.4. Modelo Dahl con entrada de voltaje externa.

El caso del amortiguador con entrada de voltaje externa cambia en los mismos aspectos que el caso homólogo del modelo Bouc-Wen. El esquema aparece en la figura 7.18.

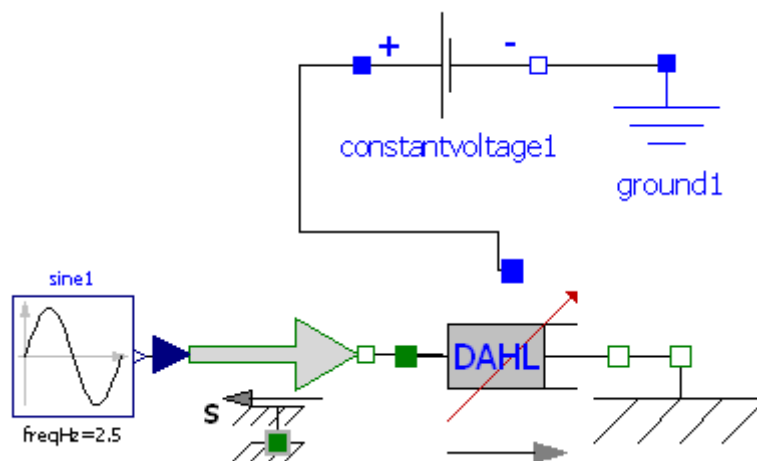
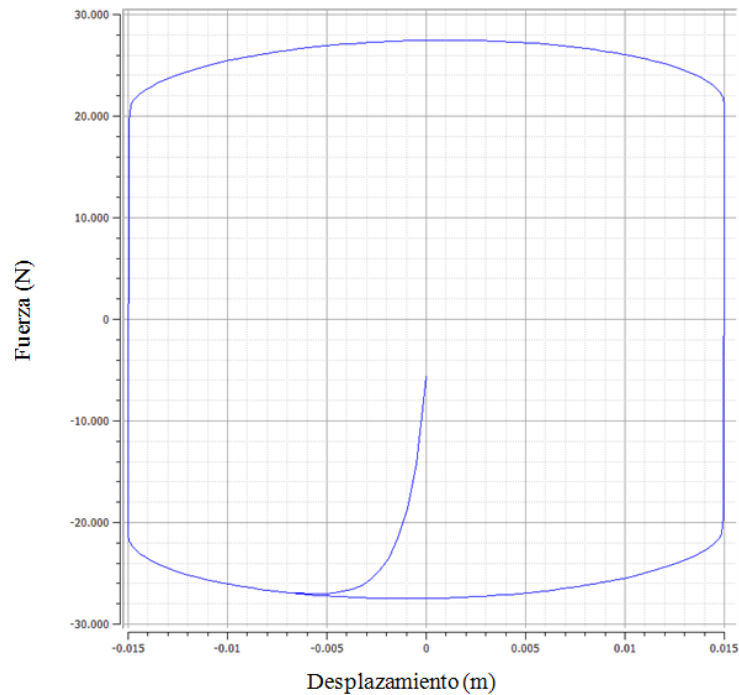


Figura 7.18: Sistema dinámico modelo Dahl con entrada de voltaje externa

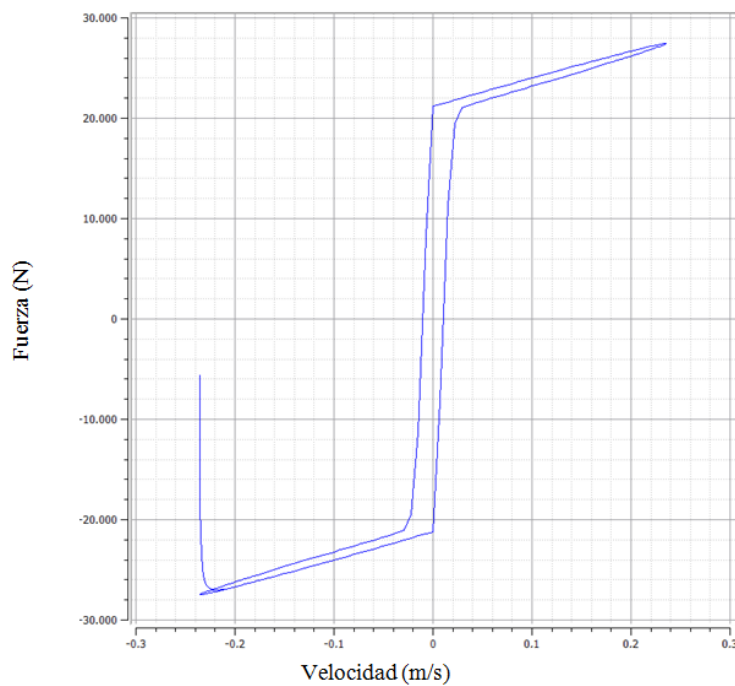


## Capítulo 7: Resultados de simulación

Los elementos eléctricos, la entrada de voltaje u la toma de tierra no cambian sus valores. Una vez el programa ha ejecutado la solución, se extraen de nuevo las curvas del amortiguador, es decir, la curva fuerza vs desplazamiento y la curva fuerza vs velocidad figuras 7.19 y 7.20 respectivamente.



*Figura 7.19: Curva de fuerza vs desplazamiento modelo Dahl simple*



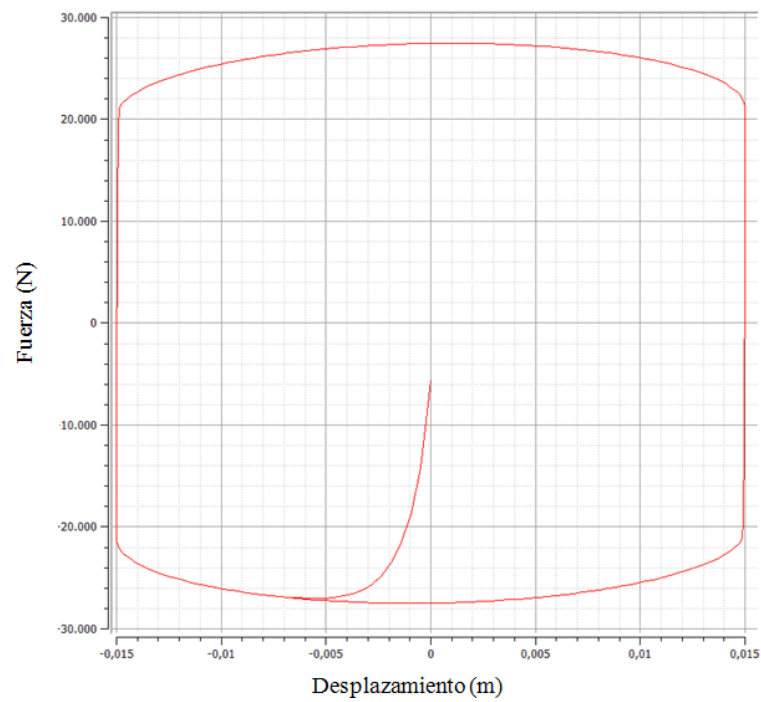
*Figura 7.20: Curva de fuerza vs velocidad en el modelo Dahl simple*

---

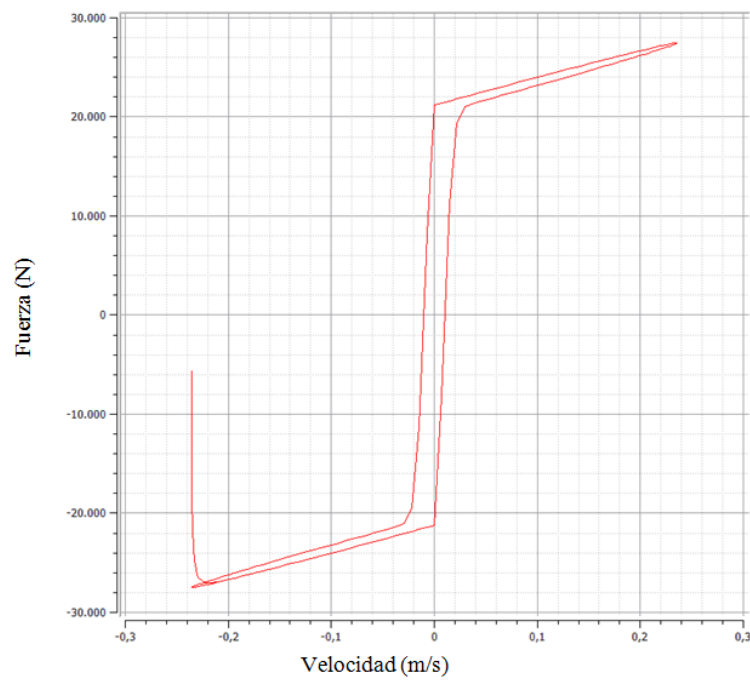
## Capítulo 7: Resultados de simulación

---

Las figuras 7.21 y 7.22 muestran las mismas curvas características obtenidas con el modelo Dahl con entrada de voltaje externa.



*Figura 7.21: Curva de fuerza vs desplazamiento en el modelo Dahl con entrada de voltaje externa*



*Figura 7.22: Curva de fuerza vs velocidad en el modelo Dahl con entrada de voltaje externa*

## Capítulo 7: Resultados de simulación

Como se puede observar, las gráficas obtenidas con uno y otro modelo son idénticas, es decir, a primera vista contrastando ambos modelos se podría decir que el resultado conseguido es válido. De nuevo para contrastar de manera definitiva los resultados obtenidos, se extraen las curvas de este modelo en *Simulink*.

El método de resolución que se ha utilizado es distinto al utilizado en los dos modelos anteriores, ya que para este modelo el programa daba problemas a la hora de integrar la variable  $z$ , por tanto se ha optado por utilizar un método con tiempo base variable y método de resolución ode 45 (Dormand-Prince).

El esquema de la programación en bloque del modelo Dahl se muestra en la figura 7.23.

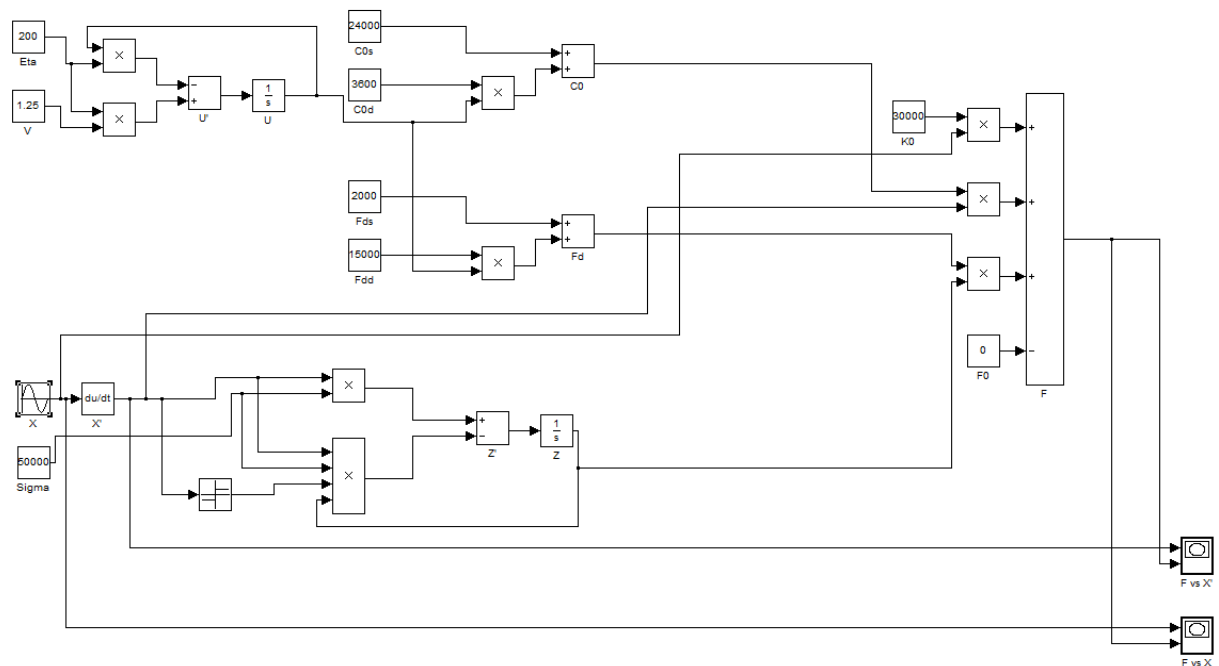


Figura 7.23: Esquema del modelo Dahl programado en Simulink

Las figuras 7.24 y 7.25 muestran los resultados obtenidos de la simulación del modelo Dahl mediante *Simulink*. Para contrastar los resultados con los obtenidos en el apartado anterior se han extraído las mismas curvas del amortiguador magneto-reológico.

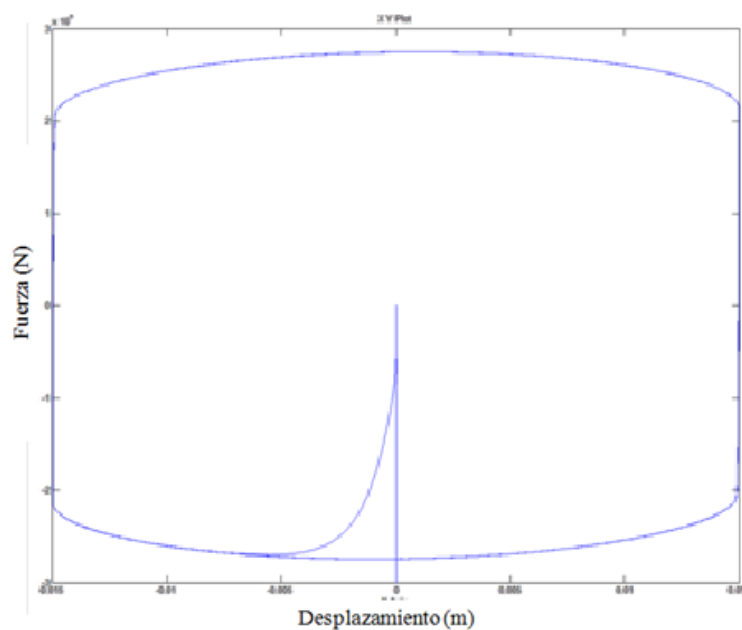


Figura 7.24: Curva fuerza vs desplazamiento en el modelo Dahl con Simulink

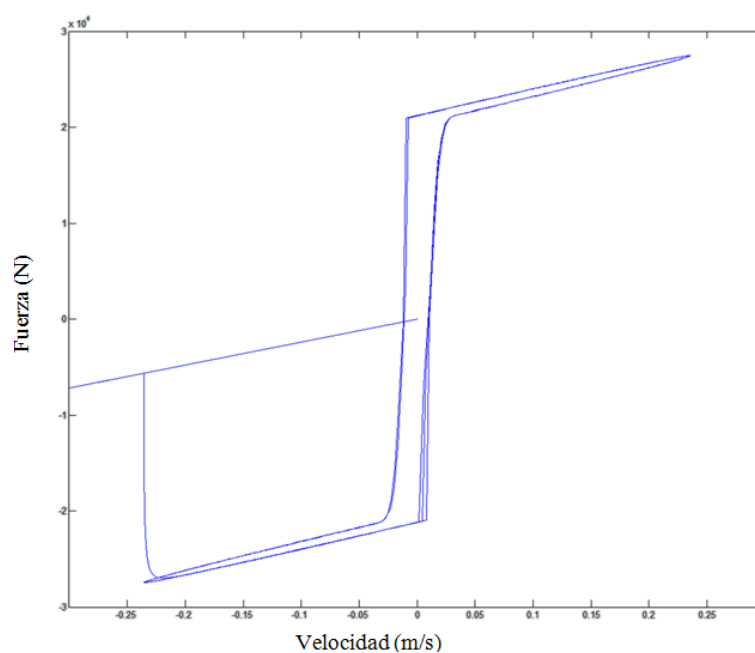


Figura 7.25: curva fuerza vs velocidad en el modelo Dahl con Simulink

De la misma manera que en el apartado del modelo Bouc-Wen se observa que los resultados obtenidos con ambos programas son prácticamente iguales. De nuevo las gráficas difieren en alguna línea que aparece debido a los diferentes métodos de resolución utilizados en cada uno de los programas.

### 7.5. Modelo Algebraico

El esquema del sistema dinámico con el amortiguador magneto-reológico algebraico se muestra en la figura 7.26.

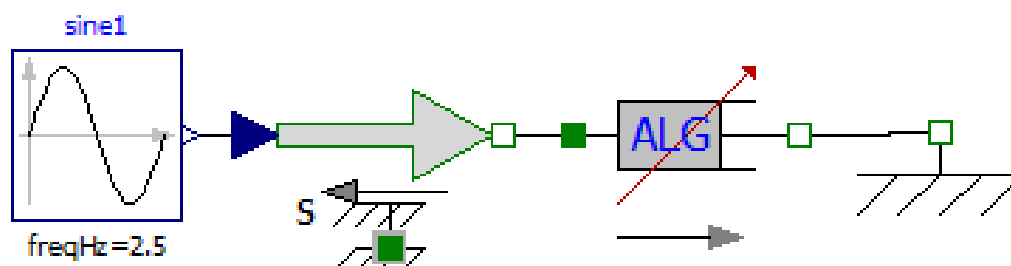


Figura 7.26: Sistema dinámico modelo Algebraico

El único elemento que cambia sus entradas es el amortiguador, ya que en este modelo se usa el modelo algebraico. El método de resolución en este modelo es el método “euler”, cuyo tiempo base es de 0,002 segundos. El cambio de modelo se debe a la aparición de errores en la simulación con los métodos anteriormente utilizados en los que el programa no lograba encontrar una solución.

La figura 7.27 muestra los valores de los parámetros de entrada del amortiguador (Modelica.Mechanics.Translational.Components.Algebraicmodel), la tabla 7.3 muestra las unidades de los mismos.

Tabla 7.3: Parámetros del amortiguador modelo algebraico

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
k	N/m
F <sub>y</sub>	N

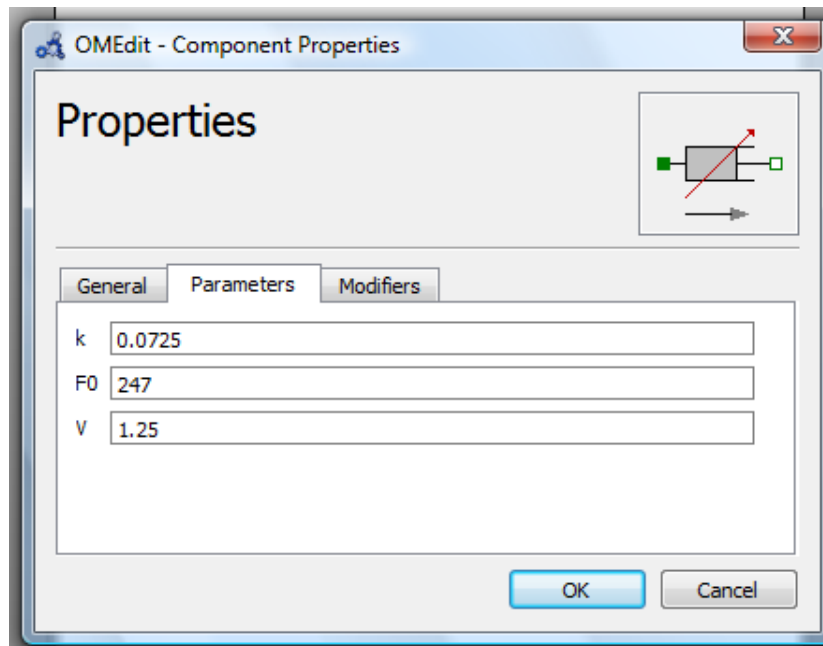


Figura 7.27: Pantalla de parámetros del amortiguador

### 7.6. Modelo Algebraico con entrada de voltaje externa

El sistema dinámico utilizado aparece en la figura 7.28.

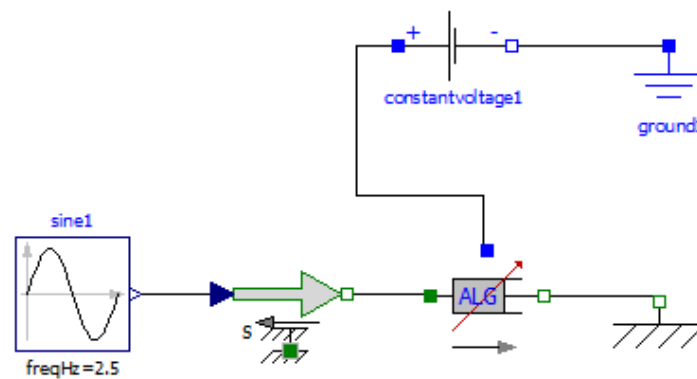
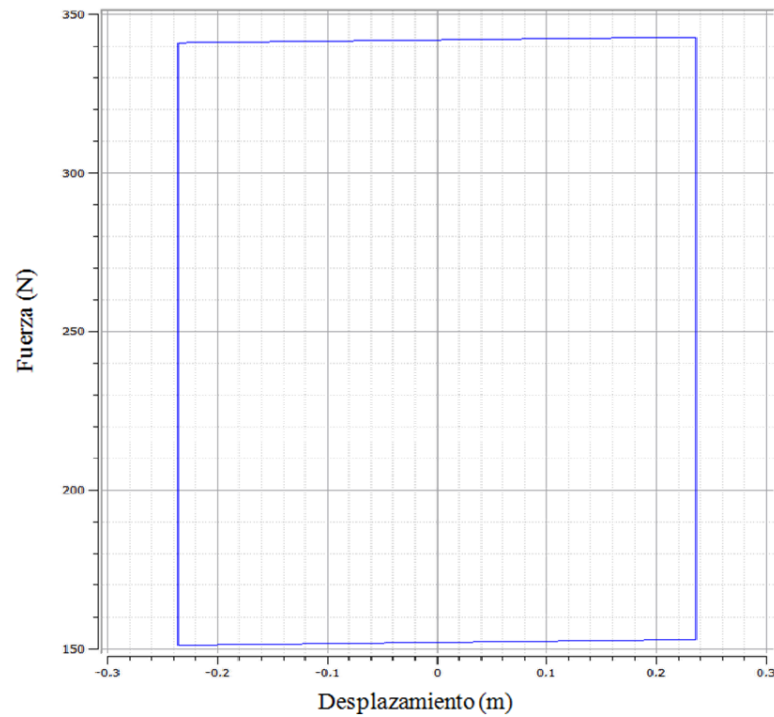


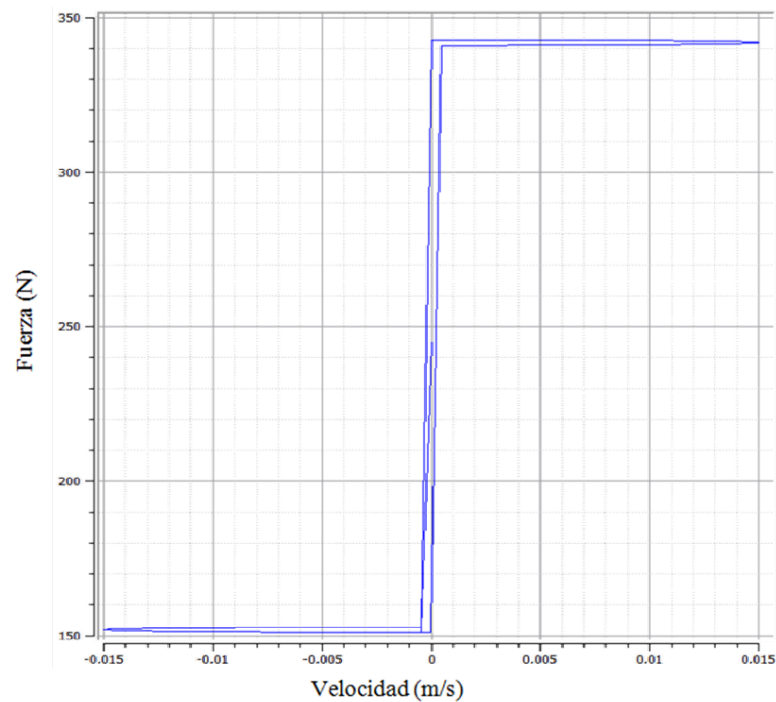
Figura 7.28: Sistema dinámico modelo algebraico con entrada de voltaje externa

Los elementos eléctricos, la entrada de voltaje u la toma de tierra no cambian sus valores.

Como en los casos anteriores, se chequea que el sistema no contiene errores, para obtener posteriormente las curvas características del modelo de amortiguador magneto-reológico algebraico. Las figuras 7.29 y 7.30 muestran las curvas fuerza vs desplazamiento y fuerza vs velocidad respectivamente.

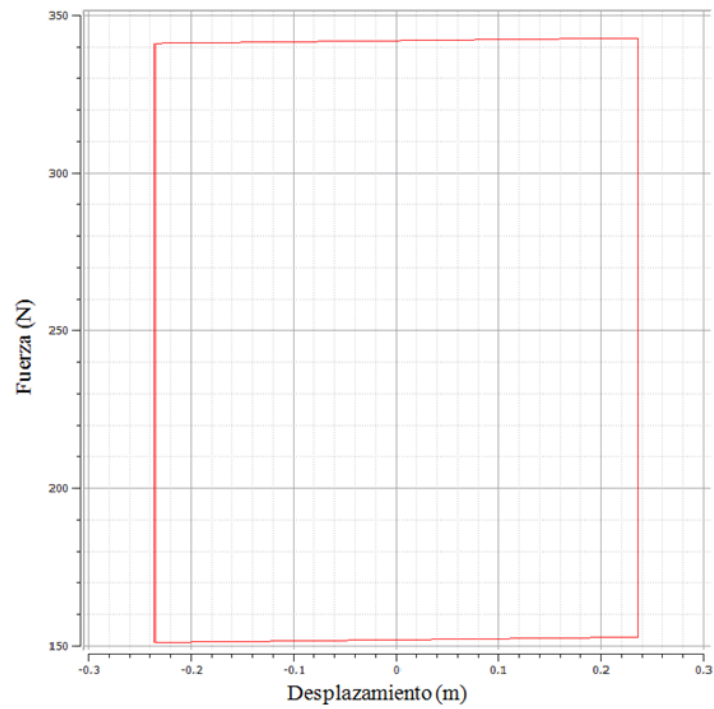


*Figura 7.29: Curva de fuerza vs desplazamiento modelo algebraico simple*

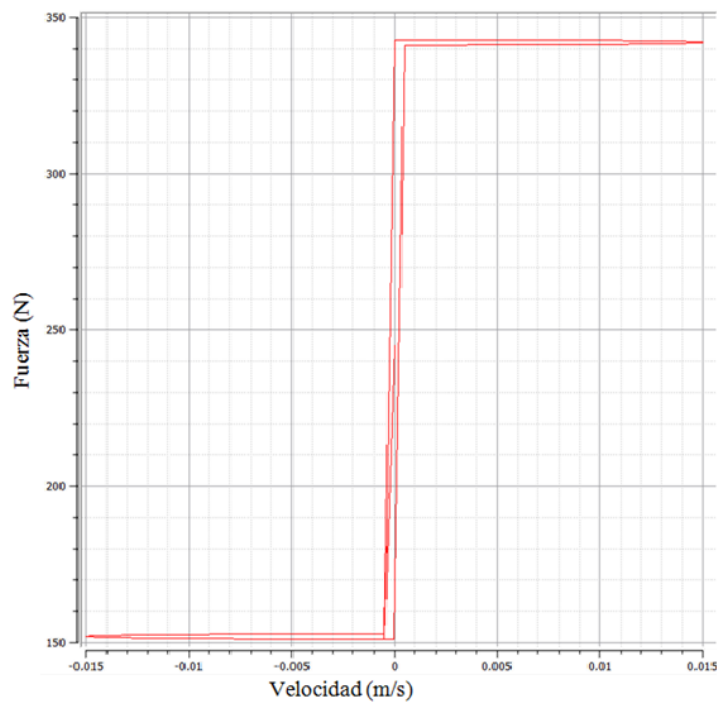


*Figura 7.30: Curva de fuerza vs velocidad en el modelo algebraico simple*

Las figuras 7.31 y 7.32 muestran las mismas curvas características obtenidas con el modelo algebraico con entrada de voltaje externa.



*Figura 7.31: Curva de fuerza vs desplazamiento en el modelo algebraico con entrada de voltaje externa*



*Figura 7.32: Curva de fuerza vs velocidad en el modelo algebraico con entrada de voltaje externa*



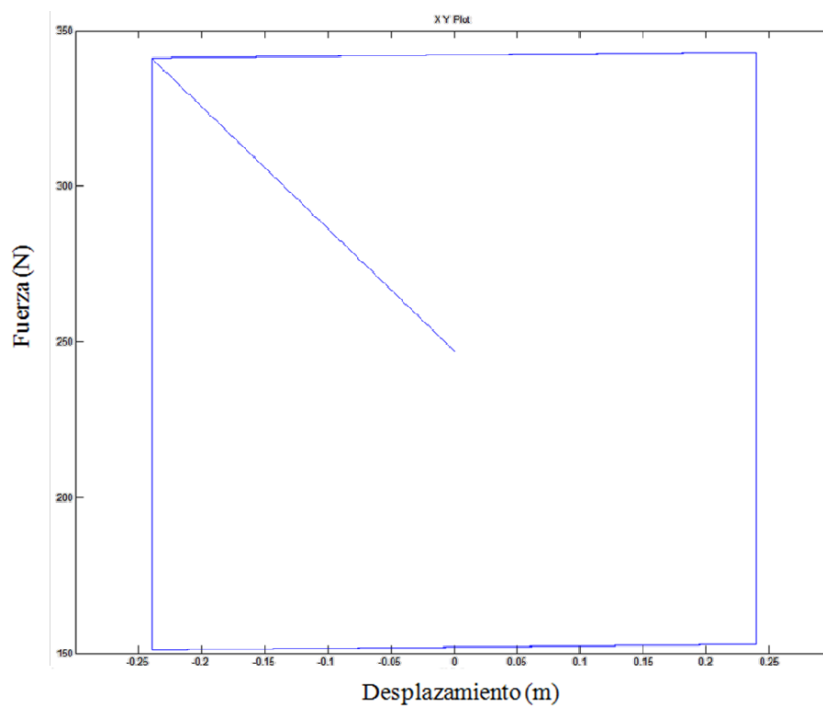
---



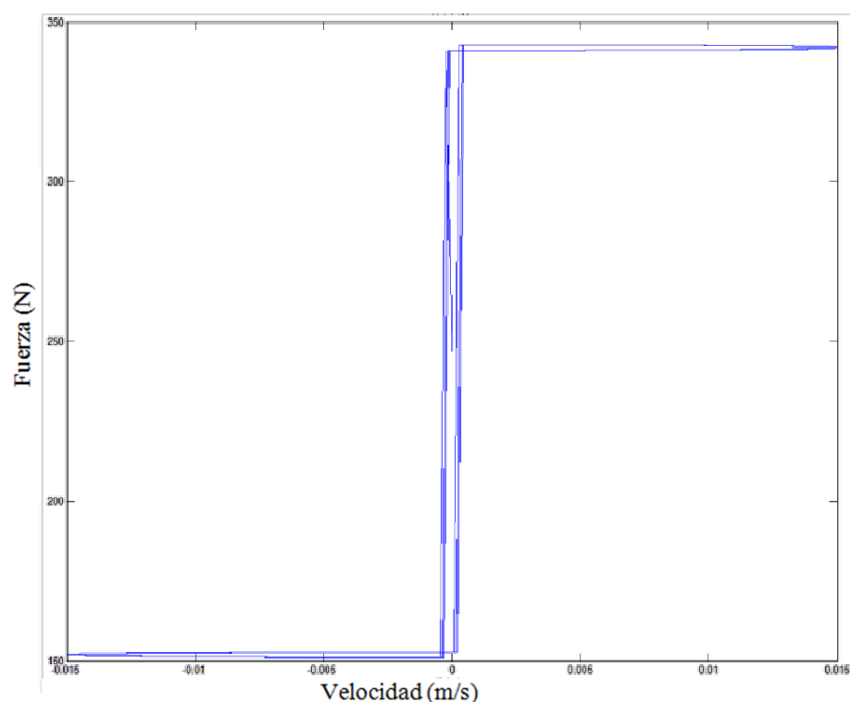
0 1 0 1 0

## Capítulo 7: Resultados de simulación

Las figuras 7.34 y 7.35 muestran los resultados obtenidos de la simulación del modelo algebraico mediante *Simulink*, para contrastar los resultados con los obtenidos en el apartado anterior se han extraído las mismas curvas del amortiguador magneto-reológico.



*Figura 7.34: Curva fuerza vs desplazamiento en el modelo algebraico con Simulink*



*Figura 7.35: curva fuerza vs velocidad en el modelo algebraico con Simulink*

## Capítulo 7: Resultados de simulación

---

Por último se observa que los valores de las graficas obtenidas en ambos programas coinciden y por tanto se considera válido el resultado obtenido en la programación del modelo algebraico.

---

## Capítulo 8

# Conclusiones

---

### **8.1. Conclusiones**

El objetivo principal del presente proyecto era el de simular el comportamiento histerístico de un amortiguador mediante los modelos Bouc-Wen, Dahl y Algebraico. Se ha simulado utilizando el programa *OpenModelica Connection Editor*; para más tarde comparar los resultados con los obtenidos en un programa más contrastado como *Simulink*. Una vez terminado el proyecto, se puede concluir que el resultado ha sido satisfactorio y que los objetivos se han cumplido.

La ventaja de utilizar *OpenModelica Connection Editor* viene dada por la forma más fácil para el usuario de programar las ecuaciones. Por tanto, es interesante saber que es posible conseguir resultados iguales con Modelica y con *Simulink*, ya que además Modelica presenta otra gran ventaja que es su accesibilidad y su condición de ser un código abierto.

Cabe destacar un aspecto de la comparación entre los distintos modelos. Los modelos estudiados poseen diferentes algoritmos que reproducen el comportamiento de un amortiguador magneto-reológico; pero no se ha conseguido el mismo resultado con los tres. En este sentido los mejores resultados se han obtenido mediante los dos modelos paramétricos, el modelo Bouc-Wen y el modelo Dahl. El modelo algebraico da como resultado unas curvas bastante aproximadas pero con transiciones demasiado bruscas entre la etapa de compresión y expansión.

Tras haber conseguido buenos resultados en la programación de los algoritmos y las expresiones de los modelos de amortiguadores magneto-reológicos, es posible que en un futuro se consigan modelizar sistemas dinámicos más complejos que contengan como elementos estas librerías.

### **8.2. Desarrollos futuros**

Futuros avances deberían conseguir una manera más fácil de programar los códigos y las librerías de Modelica, sin tener que recurrir a otro programa informático paralelo a *OpenModelica Connection Editor* como en este caso se ha recurrido a *Free Modelica Editor*.

## Capítulo 8: Conclusiones

---

En cuanto a los modelos, el desarrollo de los mismos debe encaminarse hacia la consecución de un modelo cuyo comportamiento no sea simétrico, ya que en los modelos que se han utilizado se considera el comportamiento del amortiguador idéntico tanto en carrera de compresión como en carrera de expansión. Por tanto conseguir un modelo que discriminase estos dos estados sería un gran avance.

Por último, las librerías que han sido creadas en este proyecto pueden ser de mucha utilidad a la hora de comenzar a simular sistemas dinámicos más complejos como por ejemplo vehículos automóviles.

---

## Capítulo 9

# Referencias bibliográficas

---

## Capítulo 9: Referencias bibliográficas

---

- [1] “*Principles of object oriented modeling and simulation with Modelica 2.1.*”, P. Fritzson, 1ª Edición, 2004.
- [2] “*Amortiguadores y suspensión*”. Manuales de automoción. Juan Alberdi Urdieta. Universidad de Navarra. Enero 2003.
- [3] “*Optimización de modelo Bouc-Wen de un amortiguador magneto-reológico mediante algoritmos genéticos*” Proyecto Fin de Carrera, Diego Oviedo Gutiérrez, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés 2010.
- [4] La suspensión del automóvil. Octubre 2011.  
<http://www.sabelotodo.org/automovil/suspension.html>
- [5] La suspensión. Diciembre 2005.  
<http://www.pandeo.com/cache.asp?IDRes=4571>
- [6] Sistemas de suspensión especiales. 2011.  
<http://www.efamoratalaz.com/recursos/1ºEl-Fluidos-T7.pdf>
- [7] “*Teoría de vehículos automóviles*”, F. Aparicio, C. Vera, V. Díaz, Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.
- [8] “*Caracterización dinámica del comportamiento de un amortiguador en un banco de ensayos*” Proyecto Fin de Carrera, Christian-Israel Ruiz Pérez, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés.
- [9] “*Efecto de un sistema de control activo de balanceo sobre la estructura de un autobús*” Proyecto Fin de Carrera, Francisco Javier Barroso Sánchez, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés 2009.
- [10] “*Amortiguadores magneto-reológicos*”, Miguel Cupich Rodríguez y Fernando J. Elizondo garza, Ingenierías, Julio-Diciembre 1998. Vol 1 1-5.



## Capítulo 9: Referencias bibliográficas

---

- [11] I. Sahin, T. Engin. S Cesmeci. (2010) “Comparison of some existing parametric models for magneto-rheological fluid dampers”. Smart Materials and Structures, IOP Publishing, 1-11
- [12] “*Diseño y construcción de un prototipo de amortiguador magneto-reológico*” Proyecto Fin de Carrera, César Aparicio Guzmán Mayorga, Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, 2007.
- [13] S.Cesmeci, T. Engin. (2010) “Modeling and testing of a field-controllable magnetorheological fluid damper”
- [14] P. Qi Xia. (2003) “An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification”
- [15] Q. Zhou, S.R.K. Nielsen, W. L. Qu. (2006) “Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with a magnetorheological dampers”. J.Sound vib, 296 1 -22.
- [16] J. Bastien, G. Michon, L. Manin, R. Dufour. (2007) “An analysis of the modified Dahl and Masing models: Application to a belt tensioner” Journal of Sound and Vibration 302 841-864.
- [17] L. Alvarez, R. Jimenez. (2002) “Real time identification of magnetorheological dampers”. 15<sup>th</sup> Triennial IFAC world congress. 2252.
- [18] R. Jimenez, L. Alvarez-Icaza (2005) “LuGre friction model for a magnetorheological damper”. Contrlo health monit. 12 91-116.
- [19] N. M. Kwok, Q. P. Hu (2005) “A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization sensor Actuators”. Sensors Actuators 132.
- [20] D.Guo, H. Hu. (2004) “Nonlinear stiffness of a magnetorheological damper”. Nonlinear dyn. 40.

## Capítulo 9: Referencias bibliográficas

---

- [21] “*Dinámica de sistemas*”, K. Ogata. 1ª edición. 1987.
- [22] “*Manual PHP 5*”, C. Ojeda. 1ª Edición, 2004.
- [23] A. Urquía, C. Martín-Villalba (2009) “Desarrollo en Lenguaje Modelica de Librerías de Modelos y Laboratorios Virtuales con Aplicación al Control”. Departamento de Informática y Automática Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) 1-4.
- [24] “*Modelica Meta-Programming and symbolic transformations. MetaModelica Programming Guide*”, P. Fritzson. Junio 2007.
- [25] L. J. Yebra, R. Perez, S. Dormido, M. Berenguel (2003) “Comparación entre Modelica 2.0 y Ecosimpro/el 3.2”. 2ª Reunión de Usuarios de EcosimPro, UNED, Madrid 1-5.